AKUSTISCHE ZEITSCHRIFT

Zweites Heft | Erster Jahrgang | Oktober 1936

Neuere Untersuchungen an Flügeln

Von M. Grützmacher und W. Lottermoser

Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Mit 10 Abbildungen

Die Stimmung des Flügels

Eine frühere Arbeit[1]) hatte gezeigt, daß die von einem guten Stimmer hergestellte Stimmung eines Flügels normalerweise erhebliche Abweichungen (bis zu 10 cent) von der mathematisch richtig gleichschwebenden Temperatur aufweist. Bei den Messungen war mit Hilfe von Röhrensummer und Frequenzmeßbrücke eine Meßgenauigkeit von etwa $\pm 0{,}5$ Hz erreicht worden. Neuere in gleicher Weise angestellte Versuche hatten im wesentlichen das gleiche Ergebnis, wenn auch einzelne Stimmer gefunden wurden, die in der Lage waren, die mathematische Temperierung in großer Annäherung herzustellen. Diese haben sich ein besonders kritisches Ohr für die Schnelligkeit von Terzschwebungen angeeignet und stellen die Temperatur von a bis a′ z. B. dadurch her, daß sie die Schwebungen des 5. Obertons vom jeweiligen Grundton mit dem 4. der zugehörigen Großen Terz von unten nach oben zunehmen lassen. Wenn diese Einstellung richtig ist, dann muß die Terz bei a = 219 Hz rund 9 Schwebungen und bei a′ = 438 Hz 18 pro sec hören lassen. Abb. 1 zeigt das Ergebnis einer derartigen Messung für eine Stimmung, die sich besonders gut der gleichschwebend-temperierten nähert. Die Berechnung der Schwebungsanzahl geschah hier unmittelbar durch Auswertung von oszillographischen Aufnahmen, die beim Anschlagen der Terzen a—cis, b—d usw. gewonnen wurden. Die Fehlergrenzen der gewöhnlichen Stimmungen sind durch die beiden Parallelgeraden angegeben. Beachtenswert ist die Abwechslung zwischen hoch und tief gestimmten Intervallen, doch dürften diese Unterschiede schon an der Grenze der Unterscheidungsfähigkeit des menschlichen Ohres liegen. Immerhin können dadurch bei sonst gleichmäßiger Klangfarbe der einzelnen Töne Charakterunterschiede der Tonarten erzielt werden.

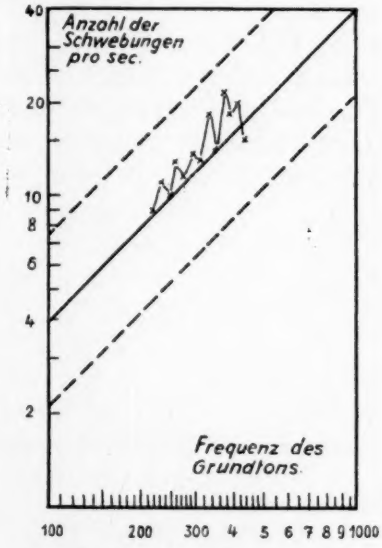


Abb. 1. Abhängigkeit der Obertonschwebungen der großen Terz von der Grundtonfrequenz

Der Versuch, einem Stimmer die Tonhöhen der mathematischen Stimmung durch den Kopfhörer zu geben und ihn dadurch die richtige Stimmung einstellen zu lassen, schlug insofern fehl, als sich trotzdem Abweichungen von 1 Hz von der idealen Stimmung herausstellten. Für die Stimmer ist also offenbar die Kontrolle der

[1]) M. Grützmacher u. W. Lottermoser, Physik. Z. 36 (1935), S. 903.

Terzschwebungen viel genauer als das Abhören der richtigen Töne und Einstellen der Saiten auf Schwebungsfreiheit mit diesen. Für die Praxis erwies sich letzteres Verfahren, wollte man es so genau durchführen wie in der früheren Arbeit (a. a. O. S. 908), als zu zeitraubend. Es kommt noch hinzu, daß bei der ruckweisen Einstellung der Wirbel, vor allem bei neuen Klavieren, eine exakte Tonhöhenbeeinflussung nur mit großen Schwierigkeiten möglich ist. Außerdem soll sich die Stimmung auf möglichst lange Zeit hinaus nicht verändern, weswegen die Stimmer alle übrigen Einflüsse, wie das Hängenbleiben der Saiten in den Agraffen, Nachgeben der Saiten durch harten Anschlag usw. berücksichtigen müssen. Bei einem Flügel heutiger Konstruktion eine haltbare, mathematische Temperatur herzustellen, dürfte daher Anforderungen stellen, die durch die Bedürfnisse unserer Musikausübung zunächst nicht gerechtfertigt erscheinen.

Meßmethoden

Von großer Bedeutung für die Tongebung eines Klaviers sind Unterschiede der Lautstärke und des Lautstärkeabfalles der einzelnen Töne. Bei einem gut intonierten und gestimmten Klavier soll die Anschlagsart, die Klangfarbe, die Dämpfung und die Lautstärke sich möglichst stetig über die gesamte Klaviatur verteilen. Dieses Ideal ist aber nur schwer zu erreichen, ja, es liegt in der Natur des Flügels, daß Unterschiede auftreten, die nur durch sorgfältige Intonation ausgeglichen werden können. Unter Intonation versteht man die vielerlei Mittel, welche dem Klavierbauer zu Gebote stehen, um durch Regulierung der Stellschräubchen an der Mechanik oder durch das Stechen der Hammerfilze z. B. die Klangfarbe und die Tonstärke der einzelnen Töne abzugleichen.

Meyer und Buchmann[1]) haben nach dem Grützmacherschen Analysierverfahren Klangspektren von Flügeltönen verschiedener Frequenz und Anschlagsintensität aufgenommen. Es wurde beobachtet, daß die Obertonzahl und -stärke mit wachsender Grundtonhöhe ab- und mit wachsender Anschlagsstärke zunimmt. — Außerdem wurde ein verschiedenes Verhalten der Obertöne beim Abklingen festgestellt, wobei manche Teiltöne exponentiell und manche in Schwebungen ausklangen. Der Grund ist entweder in einer Verstimmung der Saiten eines Chores oder darin zu erblicken, daß der Saitenton in der Nähe eines Eigentons des Resonanzbodens liegt, so daß das gekoppelte System Saite-Boden in Schwebungen ausklingt. Wolf und Sette[1]) berichteten im Rahmen einer Arbeit über einige Anwendungen neuer akustischer Apparate über den Lautstärkeverlauf von Flügeltönen. Sie kamen zu den gleichen Ergebnissen wie die erstgenannten Forscher. O. Vierling[2]) hat die Abklingkurve von mehreren benachbarten gleichzeitig angeschlagenen Klaviertönen gemessen, um den Einfluß stehender Wellen im Raume zu unterdrücken. Die Dämpfung nimmt danach während des Ausklingens ab, so daß die Neigung der Kurven mit der Zeit flacher wird.

In vorliegender Arbeit wurden mit Hilfe eines Lautstärkepegelschreibers von Neumann[3]) Messungen des Lautstärkeabfalls von Saiten verschiedener Flügel und Klaviere angestellt. Durch Vorversuche wurde ermittelt, daß in schwach abgedämpftem Raum die von dem Schallstärkemeßgerät angezeigten Werte bei nicht zu großer Entfernung des Mikrophons vom Flügel im wesentlichen unabhängig vom Aufstellungsort des Mikrophons waren. Die Tasten wurden durchweg fortissimo angeschlagen, um genügend Intensität über dem Störpegel von 30—40 Phon zur Verfügung zu haben.

Messungen an einchörigen Baßsaiten

In der Baßlage des Flügels ist von A^2 bis etwa Fis^1 für jeden Ton nur eine Saite vorgesehen, die zur Erzielung der nötigen Masse ein-, zwei- oder sogar dreimal je nach ihrer Länge mit Kupferdraht umsponnen ist. Von einem Stutz- und einem Konzertflügel wurden Klanganalysen

[1]) E. Meyer und G. Buchmann, S.-B. preuß. Akad. Wiss, Physik.-math. Kl. 1931, S. 9.

[1]) S. K. Wolf und W. J. Sette, J. Acous. Soc. Am. 6 (1935), S. 164.

[2]) O. Vierling, Z. techn. Physik 12 (1935), S. 528.

[3]) H. J. v. Braunmühl und W. Weber, Elektr. Nachr.-Techn. 12 (8) (1935), S. 223.

der Baßtöne angefertigt, wobei sich zeigte, daß die Beschaffenheit des Hammerfilzes wesentlich die Klangfarbe bestimmt. Der Konzertflügel hatte härtere Hämmer und gab deshalb einen sehr obertönigen Klang, der Stutzflügel besaß weichere Hämmer, dagegen kürzere Saiten und einen kleineren Resonanzboden. Die Klanganalyse seiner Baßtöne zeigte keine größeren Unterschiede von denen des Konzertflügels. Die Klangfarbe ist also in starkem Maße von der Intonation abhängig und kann je nach dem Verwendungszweck auf den gewünschten Grad gebracht werden. Dagegen ist die Dämpfung in viel stärkerem Maße von der Saitenbeschaffenheit abhängig. Mittelt man über eine längere Zeit die Lautstärkeabfallkurven, ohne die Krümmung des Abfalls zu berücksichtigen, so zeigt sich, daß die Dämpfung des Tones A^2 in db/sec beim Stutzflügel 6,4, beim Konzertflügel aber nur 2,5 beträgt (s. auch Abb. 7). Die längeren Saiten kleinerer Masse schwingen also wesentlich länger aus als die kurzen dicken.

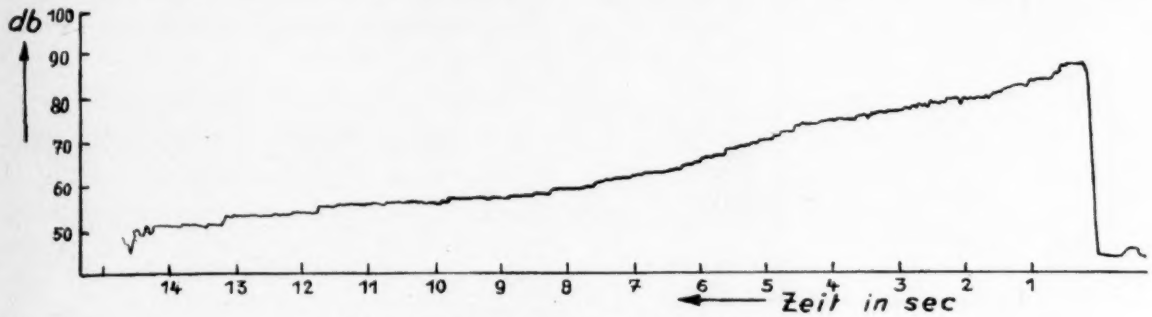


Abb. 2. Lautstärkeabfall bei A^2 (einchörig)

Eine typische Abfallkurve der Lautstärke für den Ton A^2 zeigt Abb. 2. Bemerkenswert ist erstens die schwach wellige Form der Kurve und zweitens die Abnahme der Dämpfung während des Ausklingens. Offenbar ist erstere Eigenschaft bedingt durch die Saite selbst. Es treten beim Schwingen Pendelungen in horizontaler und vertikaler Richtung auf, die akustisch nicht in gleicher Stärke wirksam sind. W. Lange[1]) hat in seinen ausführlichen Messungen diesen Kopplungseffekt beobachtet und gemessen. Es kommt noch hinzu, daß man wegen der starken Obertonbesetzung der Baßtöne einzelne Teiltöne deutlich in schnelleren Schwebungen ausklingen hört. Diese Erscheinung findet ihre Begründung darin, daß in der Nähe eines Saitenteiltons Resonanzstellen des Bodens liegen können. Es handelt sich meist um den 3., 4., 5. oder noch höheren Teilton.

Die Abnahme der Dämpfung ist auf amplitudenabhängige Reibungskräfte zurückzuführen, die nach O. Vierling[1]) dadurch erklärt werden, daß bei großen Amplituden das ganze Instrument und die Einspannstellen der Saiten mitschwingen. Es wurden Messungen des Mitschwingens der Flügelteile dadurch unternommen, daß ein magnetischer Abnehmer, der auf den Lautstärkeschreiber arbeitete, am Flügeldeckel, am Resonanzboden, an den Zargen und Füßen usw. aufgesetzt wurde. Überall wurde die gleiche Größe des Abfalls registriert. Die Vermutung O. Vierlings, daß bei großen Amplituden mehr Teile des Instrumentes mitschwingen als bei kleinen, wird durch diese Versuche nicht bestätigt. Wird eine Saite lediglich am Metallstativ gespannt, ohne mit einem Resonanzsystem gekoppelt zu sein, so wird die Dämpfung sehr klein, nimmt aber auch hier mit wachsender Abklingzeit ab. Verantwortlich dafür kann nur die Luftreibung und eine mögliche Nachgiebigkeit der Aufhängungsstellen sein.

Messungen an zweichörigen Saiten

Von etwa G^1 bis B gehören zu jeder Taste zwei Saiten, die einfach mit Kupferdraht umsponnen sind, der um so dünner wird, je höher die Töne werden. Schwebungserscheinungen

[1]) W. Lange, Hochfr. u. Elektr. Akust. 45 (1935), S. 164.

[1]) O. Vierling, Diss. Berlin 1936 und a. a. O. S. 50.

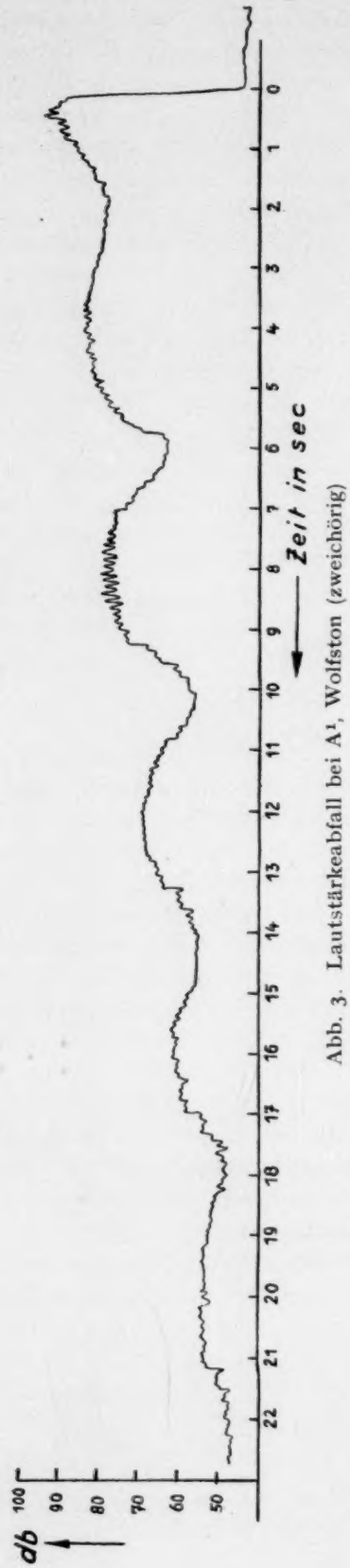


Abb. 3. Lautstärkeabfall bei A^1, Wolfston (zweichörig)

zwischen Obertönen der Saiten und Eigentönen des Bodens sind hier bei den meisten Tönen zu hören. Bei einem untersuchten Flügel wurde sogar eine starke Grundtonresonanz bei A^1 angetroffen. Abb. 3 zeigt diese Erscheinung, die als Wolfston bezeichnet wird und vor allem bei Streichinstrumenten eine große Rolle spielt[1]). Auch bei der Oktavlage A wurden bei demselben Instrument Schwebungen etwa der doppelten Anzahl beobachtet. Die schnellen Schwebungen auf der zweiten, besonders der dritten Periode rühren davon her, daß der 5. Oberton der Saite einem Eigenton des Bodens benachbart liegt. Bemerkenswert ist, daß letztere Schwebungen vom Ohre angenehm empfunden werden und etwa die gleiche Rolle spielen wie das Vibrato der Streichinstrumente.

Messungen an dreichörigen Saiten

Bei normaler Stimmung, d. h. keinem völligen Unisono zwischen den einzelnen 3 Saiten des Chores ist der Verlauf des Lautstärkeabfalls für alle Tonhöhen fast gleichartig, nur die Abfallszeiten werden nach den hohen Oktaven immer kürzer, so daß bei den höchsten Tönen der viergestrichenen Oktave die Lautstärke schon nach einer Sekunde bis auf den Störpegel von 40 Phon gesunken ist. Bei allen Saiten setzt nach dem Anschlag ein stufenweiser Abfall der Lautstärke ein, dessen Dauer um so länger ist, je schlechter die Übereinstimmung der Saiten ist. Ist die Verstimmung so stark, daß Schwebungen hörbar sind, dann zeigen die Diagramme Maxima, die naturgemäß dann noch über dem Störgeräusch liegen, wenn in der gleichen Zeit die Lautstärken gut oder normalgestimmter Saiten schon unter 40 Phon liegen. Bei Abb. 4a ist der Ton nach 3 sec praktisch völlig verklungen, während er bei Abb. 4b nach gleicher Zeit noch um etwa 17 db über dem Störpegel liegt.

Abb. 5 zeigt den Lautstärkeabfall an einer ausgesprochenen Resonanzstelle des Bodens. Außerdem wurden die drei Saiten genau aufeinander abgestimmt. Diese Maßnahme wirkt sich so aus, daß der Ton infolge seines raschen Verklingens einen trockenen und reizlosen Cha-

[1]) Hdb. Physik 8 (1927), S. 381.

rakter erhält. Der Stimmer kennt diese Erscheinung und trifft seine Gegenmaßnahmen gefühlsmäßig in einer ganz richtigen Weise, indem er künstlich eine kleine Verstimmung in den zwei Seiten, dicht am Steg zwei elektromagnetische Abnehmer angebracht, die über getrennte Verstärker auf zwei Oszillographenschleifen arbeiteten. Gleichzeitig wurde mit

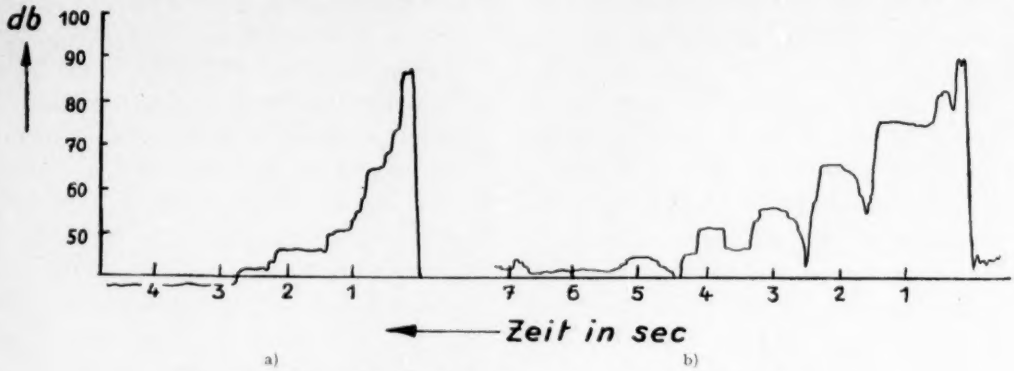


Abb. 4. a) Lautstärkeabfall bei a^2 (dreichörig, reingestimmt)
b) Lautstärkeabfall bei a^2 (dreichörig, verstimmt)

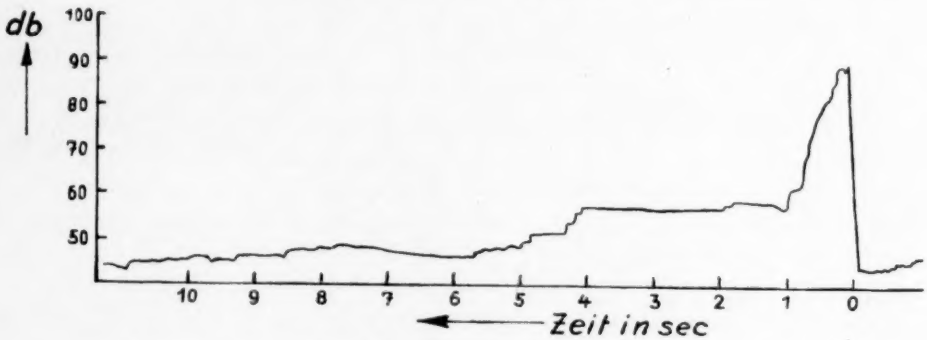


Abb. 5. Lautstärkeabfall bei a′ (dreichörig, reingestimmt)

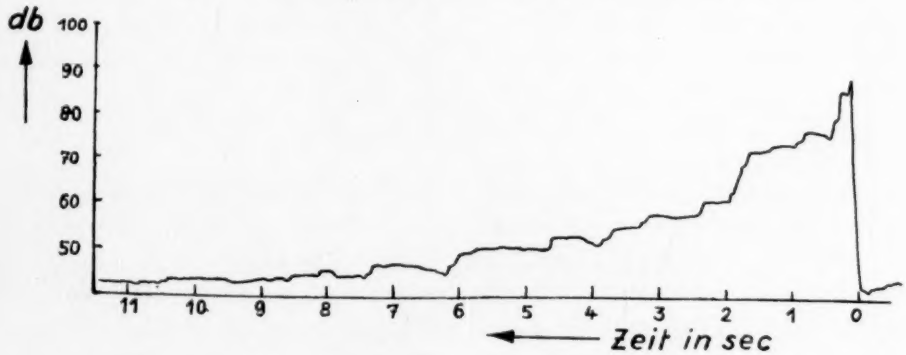


Abb. 6. Lautstärkeabfall bei a′ (dreichörig, normal gestimmt)

Saitenchören durch mehrmaliges, ganz hartes Anschlagen der Saiten herbeiführt. Sofort ist der rasche Abfall verschwunden und die Saite klingt normal aus (Abb. 6).

Um diese für die Tongebung wichtigen Verhältnisse näher zu untersuchen, wurden über einer dritten Schleife der Schallvorgang aufgezeichnet. Es ergaben sich die folgenden Verhältnisse:

Befindet sich der Saitenton in der Nähe eines Eigentons vom Resonanzboden, so verstreicht oft merkliche Zeit (z. B. 0,1 sec), bis der Re-

sonanzboden eingeschwungen ist, d. h. bis die Schallamplitude ihr Maximum erreicht hat. Bemerkenswert ist, daß sogar schwebungsähnliche Einschwingvorgänge beobachtet wurden. Ist der Boden eingeschwungen, so strahlt er die Schwingungen ab und zwar um so stärker und schneller, je kleiner der Frequenzunterschied zwischen Eigenton und Saitenton ist. Die gleichen Erscheinungen fand auch KÖNIG bei der Kopplung zwischen Stimmgabeln und Luftresonatoren[1]). Auch hier nimmt die Tondauer mit wachsender Frequenzannäherung der gekoppelten Systeme ab. Versuche, in einem Modell eine Saite mit einem Luftresonator oder einem Holzbrett bekannten Eigentons zu koppeln, zeigten dieselben Ergebnisse.

Allerdings wird nur der geringste Bruchteil der der Saite mitgeteilten Energie nach W. LANGE[2]) abgestrahlt, der Hauptteil wird offenbar durch innere Reibungen vernichtet. Jedenfalls wird aber die Saitenenergie am schnellsten im beschriebenen Fall in akustische Strahlungsenergie umgesetzt.

Sind alle Saiten rein aufeinander abgestimmt, so kommen die Auslenkungen, die vom Hammer hervorgerufen wurden, gleichphasig am Steg an, vorausgesetzt, daß die elastischen Eigenschaften der Saiten gleichartig sind. Der Steg wird also in diesem Fall in gleicher Phase von allen zwei oder drei Saiten erregt. Die Folge davon ist eine schnelle Abwanderung der Energie auf den Boden und eine kürzere Abstrahlungsdauer (Abb. 4a und 5). Geschieht die Stegerregung nicht mehr conphas etwa durch eine kleine Verstimmung in den Chören, dann kann die Energie der Saiten nicht mehr stetig und rasch übertragen werden. Die Schallabstrahlung wird immer dann größer werden, wenn die Superposition der Stegerregungen der einzelnen Saiten gleichphasig erfolgt. Da die Phasenbeziehungen der zwei oder drei Saitenbewegungen bei Verstimmung hin- und herschwanken, so verursacht diese Frequenzmodulation beim Flügel zugleich eine Amplitudenmodulation der Resonanzbodenbewegung und damit der Schallabstrahlung. Die Amplitude der Stegbewegung ist natürlich kleiner als die der benachbarten Saitenstücke, bemerkenswert ist aber, daß der Steg die superponierte Saitenbewegung in gleicher Phase mitmacht.

Der Lautstärkeabfall ist also am größten, wenn der Saitenchor auf unisono gestimmt ist und seine Frequenz gleich der eines Eigentons des Resonanzbodens ist. Diese Stellen sind aber nicht allzu häufig, sondern es überwiegen solche Töne, die dem Resonanzboden erzwungene Schwingungen mitteilen. Dann kann der Chor völlig rein gestimmt sein, denn die erzwungenen Schwingungen klingen nicht so rasch ab.

In den tieferen Lagen fallen natürlich ein oder mehrere Obertöne mit Eigentönen zusammen oder liegen in der Nähe von solchen, so daß die verschiedene Art der Dämpfung daraus ohne weiteres verständlich ist. Klanganalysen benachbarter tiefer Töne ergaben, daß sich die Resonanzlagen des Bodens dort als Formantgebiete bemerkbar machen, da unabhängig von der Frequenz des Grundtons der gleiche Frequenzbereich mit Obertönen größerer Intensität besetzt ist. In den mittleren Oktaven kommt man dagegen mit dem Grundton in den Bereich der Eigentöne selbst, so daß dort die oben genannte Erscheinung des starken Lautstärkeabfalls eintritt. In den obersten Oktaven wurden häufig sehr schnelle Schwebungen infolge von Verstimmungen in den Chören bemerkt, weil wegen des schnellen Abklingens die Einstellung auf Schwebungsfreiheit schwierig ist und das Empfinden für Tonhöhenunterschiede geringer wird.

Vergleich des Lautstärkeabfalles bei verschiedenen Instrumenten

Da die Frage nach der Qualität der Instrumente gemessen an der Dämpfung des Ausklingungsvorganges auch den Klavierbauer interessierten, wurden in Abb. 7 die Messungen des Lautstärkeabfalls von verschiedenen Flügel- und Klaviertypen aufgezeichnet. Es wurden bei den Versuchen alle „a" und dessen Oktavlagen gemessen und ein Maß für die Dämpfung der Töne durch Mittelung über den gesamten Abfall bis auf den Störpegel gewonnen. Es geht daraus der allgemeine Verlauf solcher Dämp-

[1]) Hdb. Physik 8 (1927), S. 212.
[2]) W. LANGE, a. a. O. S. 51.

fungskurven, die in der Contraoktave meist ein Minimum mit Anstieg nach höheren Frequenzen haben, hervor. Natürlich sind die Abweichungen der einzelnen Töne von diesen Kurven sehr groß und streuen oft um etwa 30%, je nachdem, ob die Chöre reingestimmt waren und Resonanzstellen vorlagen. Im allgemeinen sind auch Töne benachbarter Tasten in ihrer Klangfarbe und ihrer Dämpfung oft völlig verschieden, denn bei

Untersuchungen am Resonanzboden

Bisher sind zwei vollständigere Untersuchungen über Resonanzböden von BERRY[1]) und MAHARJAN[2]) angestellt worden. Berry fand, daß die Eigentöne des Bodens maximale Schwingungsamplituden an bestimmten Stellen besitzen, während MAHARJAN aus seinen Messungen, welche er an den Versteifungsrippen des

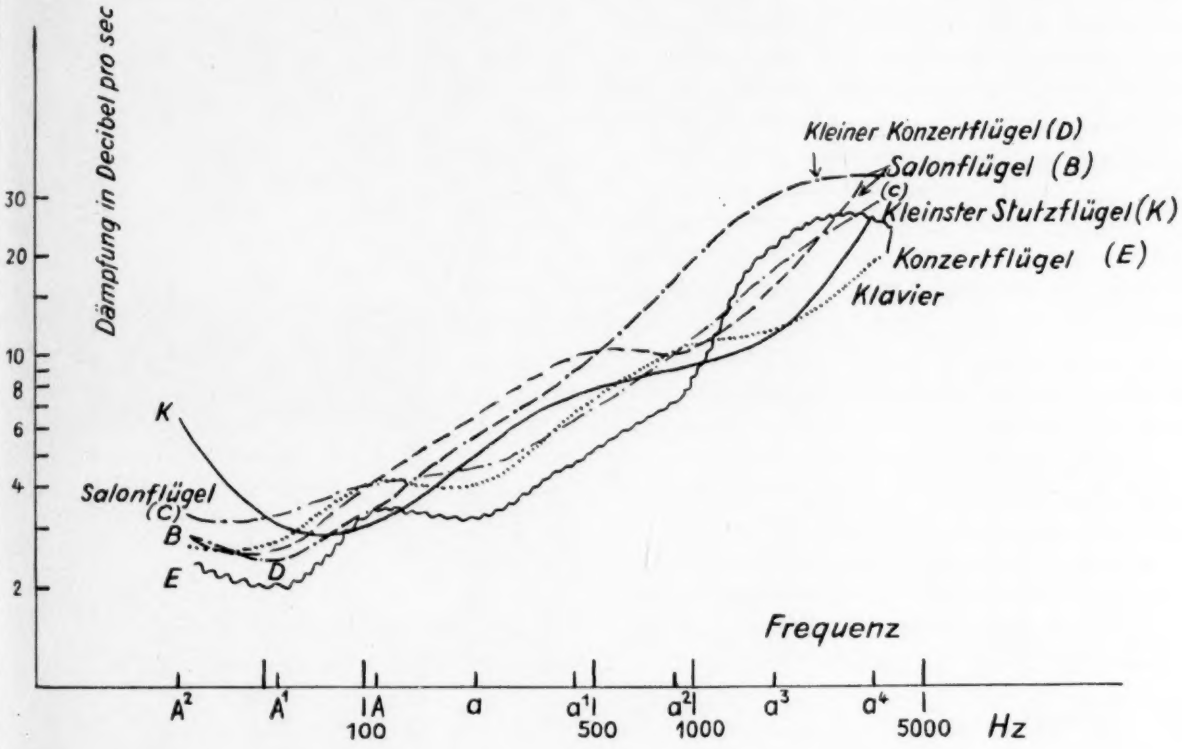


Abb. 7. Dämpfung verschiedener Klavier- und Flügeltöne

den ausgeprägten Eigentonlagen jedes Resonanzbodens wechselt das Stärkeverhältnis und der Dämpfungsgrad der Obertöne oft von Ton zu Ton. So kann nur in erster Annäherung gesagt werden, daß beim Stutzflügel die Baßsaiten sehr rasch verklingen, also nicht den Wohllaut größerer Flügel aufweisen. Sogar beim Klavier sind oft länger ausklingende Baßtöne gemessen worden als beim Stutzflügel. Natürlich hat der Baß des Konzertflügels die kleinste Dämpfung. In den obersten Diskantlagen wurde beim Klavier die kleinste Dämpfung gemessen.

Bodens machte, folgerte, daß der Resonanzboden als Ganzes schwingt. Nur die Amplitudengröße ändere sich von Rippe zu Rippe in der Weise, daß an den Rippen größerer Länge höhere Teiltöne mit größerer Amplitude beobachtet wurden als an den kürzeren.

In ähnlicher Weise, wie BACKHAUS[3]) Messungen an den Geigenkörpern nach Amplitude und Phase vornahm, wurden hier Untersu-

[1]) G. H. D. BERRY, Philos. Mag. 20 (1910), S. 652.
[2]) MAHARJAN, Indian J. Physics 4 (1929), S. 515; 7 (1932), S. 539.
[3]) H. BACKHAUS, Z. Physik 62 (1930); 72 (1931).

chungen an Resonanzböden ausgeführt nur mit dem Unterschied, daß an Stelle der elektrostatischen Abnahme eine elektromagnetische Abtastvorrichtung benutzt werden konnte. Dies Verfahren ist deshalb unbedenklich anwendbar, weil die schwingende Masse des etwa 8 mm dicken Bodens so groß ist, daß keine Störungen der Schwingungsform durch die geringe Zusatzmasse des Abtasters zu befürchten sind. Dieser bestand aus einem Stift, der mit einem Eisenplättchen verlötet war, das vor den Polen eines Magnetsystems schwingen konnte. Durch Aufsetzen des Stiftes auf verschiedene Stellen des Bodens wurde die Stärke des Mitschwingens ermittelt. Zu diesem Zweck war das Magnetsystem mit einem Verstärker verbunden, an dessen Ausgang ein Wechselstrominstrument lag. Dessen Ausschläge sind dann ein Maß für die Amplituden des Bodens. In Abb. 8 sind die Messungen bei verschiedenen Frequenzen so wiedergegeben, daß die stärkste Amplitude immer gleich 100 gesetzt ist. Die Saiten wurden während der Messung möglichst im Grundton mit einem Magnetsystem erregt, durch dessen Spulen der Ausgangsstrom eines Schwebungssummers mit Verstärker floß. Der abgestrahlte Schall konnte mit Mikrophon und Oszillograph auf seine Grundtönigkeit geprüft werden. Tiefe Töne wurden durch ein auf den Baßsteg aufgeschraubtes Eisenplättchen erhalten, das auf die gleiche Art wie die Saiten angeregt wurde, denn die stark kupferumsponnenen Saiten erlaubten die Anwendung der erstgenannten Methode nicht.

Aus den Messungen geht hervor, daß jeder Ton Stellen maximalen Ansprechens besitzt und zwar so, daß bei sehr ausgedehnter, starker Erregung wie hier bei cis² eine Eigenresonanz vorliegt, die sich durch obengenannte Abstrahlungseigenschaften auszeichnet. Es entspricht also jeder Frequenz ein bestimmter Erregungszustand des Bodens. Der über dem Baßbalken liegende Teil des Bodens ist für die Schallabstrahlung bedeutungslos.

Die Messung des Phasenzustandes des Bodens geschah mit Hilfe zweier elektromagnetischer Abtaster, von denen einer festblieb, während der andere laufend versetzt wurde. Beide arbeiteten über getrennte Verstärker auf zwei

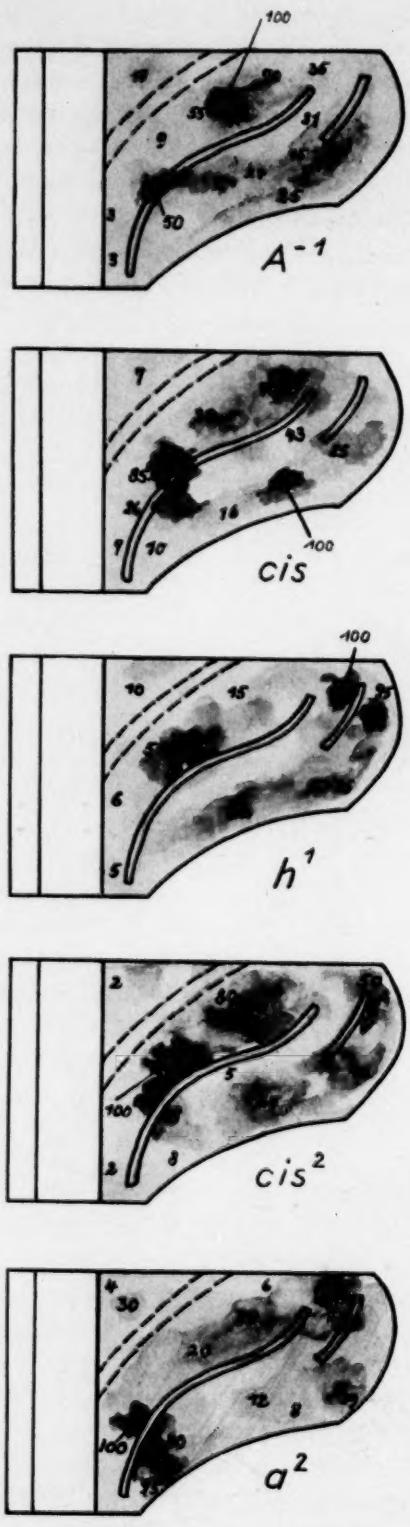


Abb. 8. Stärke der Erregung des Resonanzbodens bei verschiedenen Frequenzen

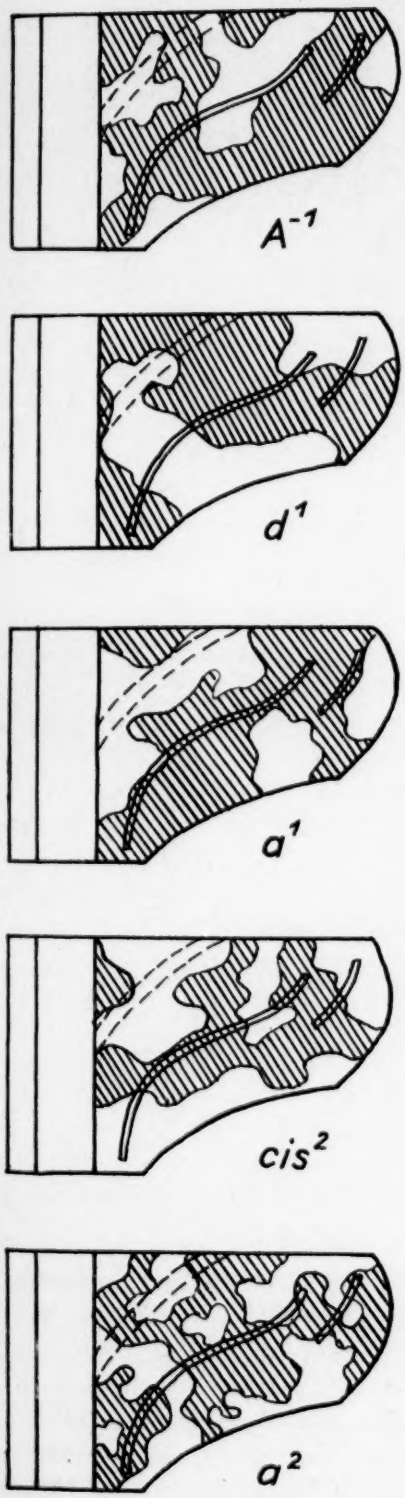


Abb. 9. Phasenzustand des Resonanzbodens bei verschiedenen Erregungsfrequenzen

Oszillographenschleifen, so daß Gleich- oder Gegenphasigkeit der Erregung abgelesen werden konnte. Die Schallerregung geschah in der oben beschriebenen Weise. Nach Abb. 9 schwingt der Boden niemals als Ganzes, sondern stets unterteilt, wie es ja auch von so einer großen und heterogenen Fläche zu erwarten war. In gleich gezeichneten Flächen herrscht Gleichphasigkeit, in den schraffierten, im Verhältnis zu den weißen, Gegenphasigkeit. Der Übergang zwischen beiden erfolgt nicht immer streng über eine scharfe Knotenlinie, sondern geht oft allmählich vor sich. Die Abgrenzungslinien sind deshalb nur in erster Annäherung als Knotenlinien aufzufassen. Die Aufteilung in kleinere gegenphasigschwingende Flächen nimmt nach den Versuchen mit steigender Frequenz zu. Bemerkenswert ist besonders, daß die Stege und Versteifungsrippen nicht als Knotenlinien der Bewegung wirken, so daß Gleichphasigkeit zu beiden Seiten von ihnen herrscht. Dagegen schwingen Stege und Rippen an verschiedenen Stellen gegenphasig, so daß man daraus ableiten kann, daß es nicht der Zweck der Rippen sein kann, für die Fortleitung der Impulse des Steges über den ganzen Boden zu sorgen. Sie dienen nur dazu, eine allgemeine Versteifung der strahlenden Fläche hervorzurufen, um eine zu große Aufteilung in gegenphasig schwingende Teile zu verhindern.

Schallabstrahlung des Flügels

In der Umgebung zweier Flügel verschiedener Fabrikate wurden Lautstärkemessungen unternommen, die bei gleichen Erregungsfrequenzen die gleichen Ergebnisse zeigten. Um raumakustische Einflüsse auszuscheiden, wurden die Beobachtungen nur bis zu solchen Entfernungen am Flügel ausgedehnt, bis eine Unstetigkeit in der kontinuierlichen Lautstärkeabnahme eintrat. Das Mikrophon des Lautstärkemessers befand sich dabei in Ohrhöhe eines sitzenden Menschen, etwa 1,20 m vom Fußboden entfernt. Die Saiten der Flügel wurden auf die oben beschriebene Art zum Tönen gebracht. Abb. 10 gibt die so gewonnenen Kurven gleicher Lautstärke, die in Abständen von 3 Phon gezeichnet wurden, wieder. Der Schall

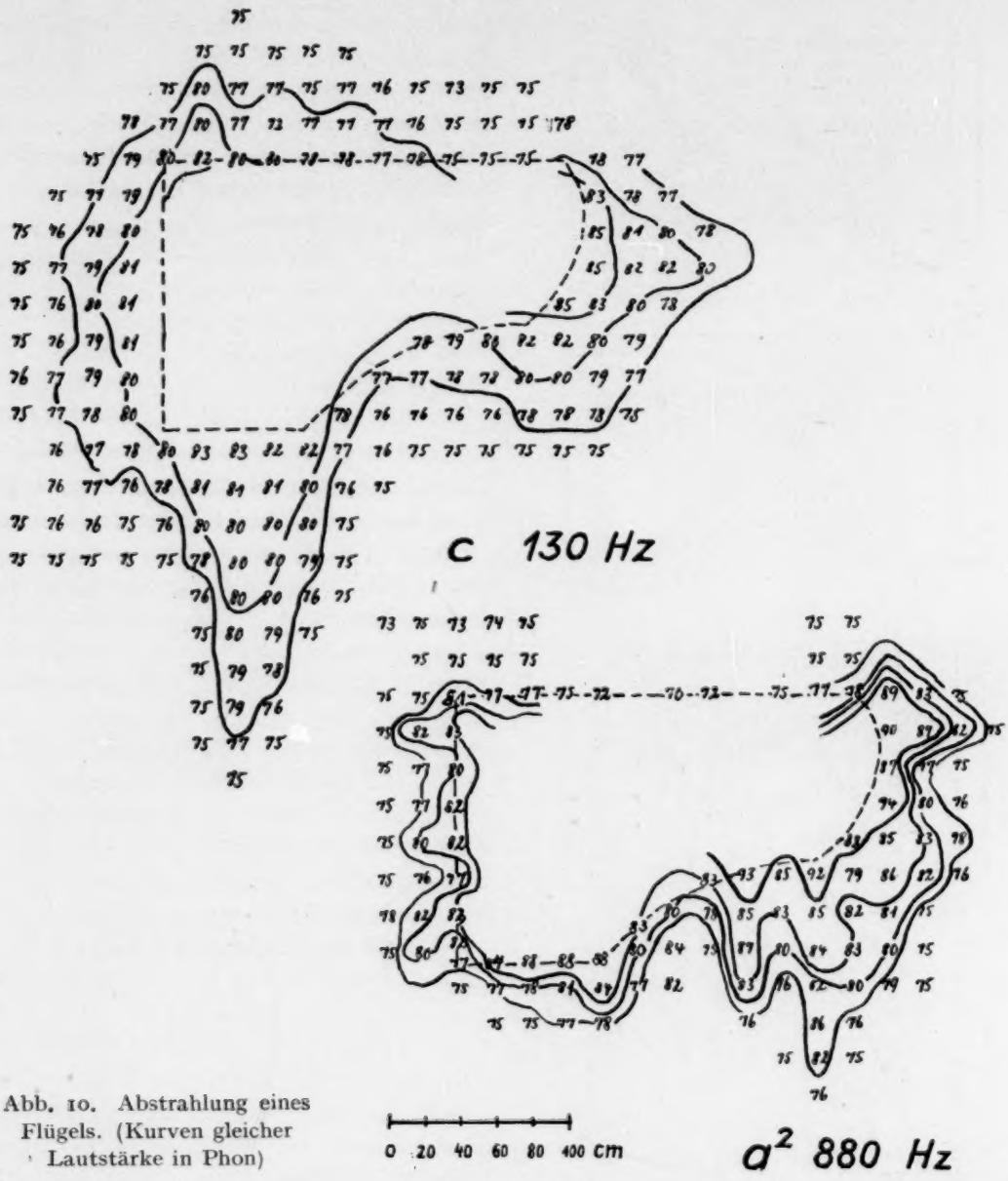


Abb. 10. Abstrahlung eines Flügels. (Kurven gleicher Lautstärke in Phon)

wird vorzugsweise nach rechts und nach hinten, vom Spieler aus gesehen, abgestrahlt. Der Deckel als reflektierende Wand war hochgestellt und verhindert eine Abstrahlung nach links. Die Kurven laufen hier stets nahe an den Flügel heran. Bei tiefen Tönen findet die stärkste Abstrahlung nach rechts vorn, etwas weniger auch nach hinten statt. Bei höheren Frequenzen wandert das Maximum der Abstrahlung nach hinten. Senkrecht zur Zargenmitte und nach dem Spieler zu ist die Schallabgabe gering. Bemerkenswert ist die starke Richtwirkung der hohen Frequenzen, die bei der Abstrahlung der vielen kleinen gegenphasigschwingenden Flächen auftritt.

Vorliegende Arbeiten wurden teilweise mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft ausgeführt, wofür an dieser Stelle herzlich gedankt sei. Weiteren Dank schulden wir der Firma C. Bechstein, die uns ihr großes Material an Flügeln und Klavieren zur Verfügung stellte.

(Eingegangen am 15. August 1936.)

Klangeinsätze an der Orgel

Von F. Trendelenburg, E. Thienhaus und E. Franz

Mitteilung aus dem Forschungslaboratorium der Siemens-Werke und der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt

Mit 3 Abbildungen und 6 Tafeln

I. Einleitung

Nach den klassischen Untersuchungen von C. STUMPF[1]) und den grundlegenden Arbeiten von H. BACKHAUS[2]) haben die Klangeinsätze größte Bedeutung für die Klangwirkung; die Erkennbarkeit von Klängen ist sehr schlecht, wenn man dem Ohr nur die stationären Anteile darbietet. Es war zu vermuten, daß auch für den Orgelklang die Einschwingvorgänge wichtig sind. Um die Eigenart der Einschwingvorgänge aufzuklären, haben wir an einer Reihe von Orgelpfeifen Oktavsieboszillogramme aufgenommen. Die Untersuchungen wurden an der im Jahre 1706 von ARP SCHNITGER, Hamburg, erbauten Orgel in der Eosanderkapelle des Charlottenburger Schlosses durchgeführt[3]). Die Orgel wurde im Jahre 1931 von E. Kemper & Sohn, Lübeck, unter möglichster Anlehnung an bekannte, historische Vorbilder wiederhergestellt; sie zeichnet sich, wie viele Orgeln aus der in Frage stehenden Zeit, durch besonders charakteristische und ansprechende Klangwirkungen aus.

II. Untersuchungsmethode

Da die Methode der oszillographischen Aufzeichnung unter Benutzung von Oktavsieben, wie bei früheren Messungen[1]) gezeigt wurde, zur Untersuchung schnell veränderlicher Schallvorgänge sehr leistungsfähig ist, haben wir diese Methode auch für die vorliegende Arbeit benutzt. Abb. 1 zeigt das Grundsätzliche der Anordnung. Von einem Kondensatormikrophon *M* wird ein Verstärker gesteuert, dessen Ausgang

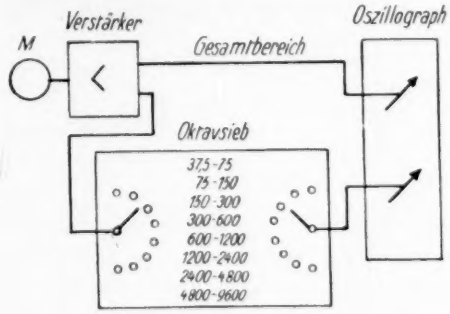


Abb. 1. Meßanordnung

einmal direkt an eine Oszillographenschleife gelegt wird und das andere Mal über ein stufenweise einstellbares Oktavsieb eine zweite Oszillographenschleife betätigt. Das (von G. THILO[2] gebaute) Oktavsieb konnte auf die Durchlaßbreiten 37,5—75, 75—150, 150—300, 300—600, 600—1200, 1200—2400, 2400—4800, 4800 bis 9600 Hz eingestellt werden. Die durch die Einschwingvorgänge der Oktavsiebe selbst hervorgerufenen Verfälschungen der Klangeinsätze sind sehr gering; es sei dieserhalb auf die aus-

[1]) C. STUMPF, Die Sprachlaute, Berlin 1926, S. 374.
[2]) H. BACKHAUS, Z. techn. Physik 13 (1932), S. 31.
[3]) Wir möchten an dieser Stelle der Verwaltung der Staatlichen Schlösser und Gärten auf das Beste für die Genehmigung der Versuche in der Eosanderkapelle danken. Insbesondere hat uns Herr Oberinspektor NÜSKE stets gern unterstützt.

[1]) F. TRENDELENBURG und E. FRANZ, Z. techn. Physik 16 (1935), S. 513.
[2]) Vgl. G. THILO und U. STEUDEL, Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 14/1 (1935), S. 79.

führliche kritische Behandlung an anderer Stelle[1]) verwiesen.

In den Tafeln I bis VI sind eine Reihe der Oktavsieboszillogramme abgebildet, und zwar ist jeweils der obere Streifen das Oszillogramm des gesamten Schalles, während der untere Streifen nur diejenigen Komponenten, die das betreffende, gerade eingestellte Oktavsieb durchlaufen haben, enthält. Auf allen Bildern ist eine Zeitmarke von 500 Hz niedergeschrieben. Die Tasten wurden mit größtmöglicher Gleichförmigkeit mit der Hand angeschlagen. Bei den meisten Orgelpfeifen, insbesondere bei den Zungenregistern, sind die einzelnen Einsätze sehr gut reproduzierbar. Es ließ sich daher ohne weiteres verantworten, die verschiedenen Oktavbereiche zeitlich nacheinander aufzunehmen. An sich wäre es möglich gewesen — wie es z. B. in der genannten Veröffentlichung[1]) geschehen ist — mit einer Mehrzahl von Oszillographenschleifen die gesamte Folge der Oktavsiebe gleichzeitig aufzunehmen; mit Rücksicht auf die dazu erforderliche umfangreiche Apparatur wurde aber hiervon Abstand genommen. Um ganz sicher zu gehen, haben wir von einigen Orgelklängen Tonfilmstreifen aufgenommen[2]) und diese dann später über einen gleichzeitig eingeschalteten Satz von 5 Oktavsieben abgespielt; diese Aufnahmen zeigen, daß die zeitliche Zueinanderordnung der nacheinander aufgenommenen Oszillogramme richtig war (Abb. 2).

Die Eosanderkapelle hat eine verhältnismäßig geringe Nachhallzeit von höchstens etwa 1 sec. Raumakustische Störungen sind kaum zu erwarten und wurden außerdem dadurch praktisch ausgeschaltet, daß das Kondensatormikrophon stets in unmittelbarer Nähe der Pfeifen (ca. $^1/_2$ m vom Pfeifenmaul bzw. vom Becherrand entfernt) stand.

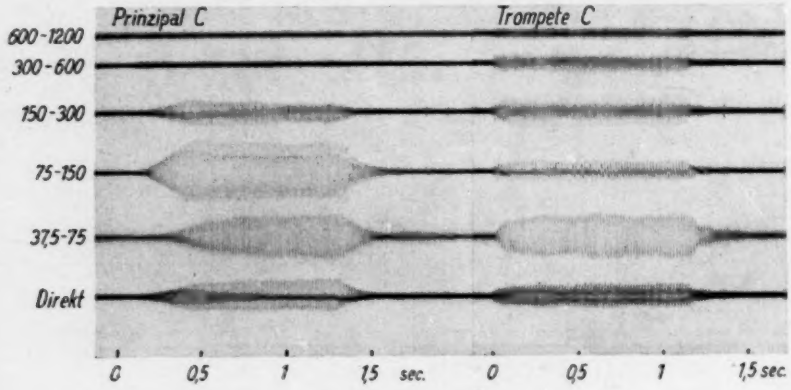


Abb. 2. Oktavsieboszillogramme, durch Umschreiben eines Schallfilms gewonnen

III. Untersuchungsergebnisse

Die Aufnahmen wurden im allgemeinen auf den C-Tasten der verschiedenen Oktaven durchgeführt. Die Grundtöne lagen also jeweils etwa in der Mitte der Durchlaßbereiche des Siebes. Da naturgemäß nicht sämtliche Register untersucht werden konnten, wurden einige besonders typische ausgewählt. Von den Lippenregistern wurden Aufnahmen gemacht am „Prinzipal 8′″[1]) (offene, zylindrische Zinnpfeifen normaler Mensur), am „Lieblich Gedackt 8′″ (gedackte, prismatische Holzpfeife verhältnismäßig enger Mensur) und an der „Floite dues 4′″ (offene, konische Holzpfeife enger Mensur). Von den Zungenregistern (sämtlich aufschlagende Zun-

[1]) F. TRENDELENBURG und E. FRANZ, Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 15/2 (1936), S. 78.

[2]) Mit einer liebenswürdigerweise von der Klangfilm GmbH. zur Verfügung gestellten laboratoriumsmäßigen Ausführung einer von E. GERLACH entwickelten Schallfilmanordnung.

[1]) „8′″ (lies 8 Fuß) heißt: Die größte Pfeife (Taste C) dieses Registers ist 8 Fuß, also etwa $2^1/_2$ m lang. Es handelt sich hier um eine Bezeichnung der Oktavlage. Ein 8′-Register hat die Normallage (a^1 = 435 Hz), ein 4′-Register klingt eine Oktave höher, ein 16′-Register eine Oktave tiefer usw.

gen, Becherform vgl. Abb. 3) wurden untersucht: „Posaune 16'" (konischer Holzbecher normaler Mensur), „Trompete 8'" (konischer Zinnbecher weiter Mensur), „Cornett 2'" (konischer Zinnbecher normaler Mensur), „Hoboy 8'" (trichterförmiger Kupferbecher) und „Vox humana 8'" (doppel-konischer Zinnresonator). Die Auswertungen der Aufnahmen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt.

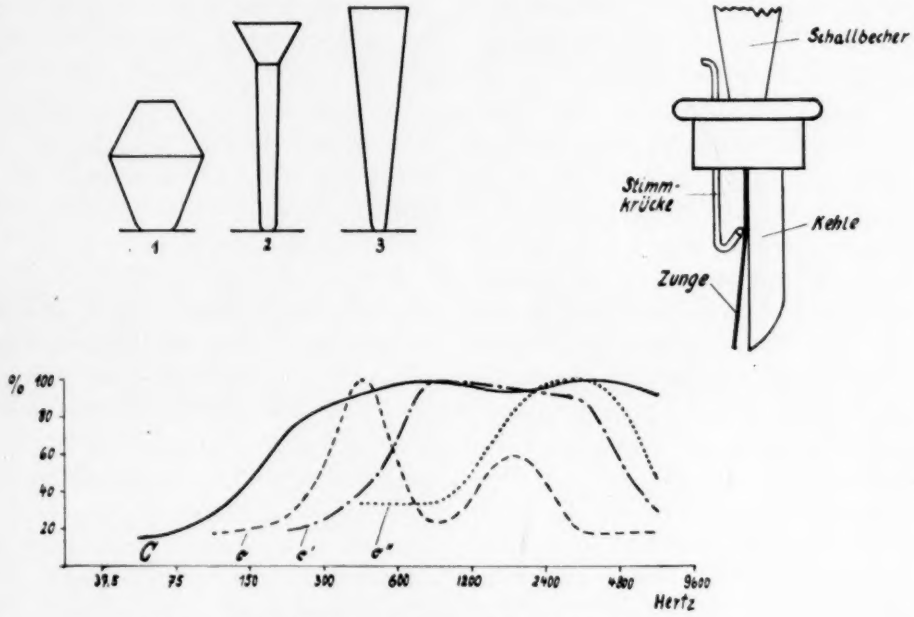


Abb. 3. Lage der Becherresonanz bei der Vox humana.
Becherform der Zungenregister: 1) Vox humana, 2) Hoboy, 3) Posaune, Trompete, Cornett

Die Auswertung zeigt zunächst einen grundsätzlichen Unterschied zwischen den Einschwingvorgängen der Lippenpfeifen und denen der Zungenpfeifen. Bei den Lippenpfeifen, und zwar insbesondere beim Prinzipal (Tafel I), erfolgt der Toneinsatz äußerst langsam; offenbar dauert der Aufbau der periodischen Wirbelfolge am Oberlabium recht beträchtliche Zeit. Beim Ton C hat der Grundton erst nach etwa 0,5 sec 80% der Endamplitude erreicht, bei c^0 nach fast 0,2 sec und bei c^1 und c^2 nach rund 0,1 sec. Demgegenüber bauen die Zungenpfeifen im allgemeinen sehr schnell auf. So benötigt beispielsweise bei der Trompete 8' (Tafel IVb) der Grundton auf C nur etwa 0,1 sec, also den 5. Teil der beim Prinzipal erforderlichen Zeit, um auf 80% der Endamplitude anzuwachsen. Bei den höheren Teiltönen der Trompete erfolgt der Aufbau noch rascher.

Grundsätzlich ist weiter zu bemerken, daß bei den Zungenregistern der Einsatz von Anschlag zu Anschlag sich meist völlig identisch wiederholt (vgl. z. B. die Tafeln IVa, IVb, Va). Bei den Lippenpfeifen ist dieses nicht der Fall. Zwar kehrt das Typische[1]) von Anschlag zu Anschlag wieder, aber kleine Einzelheiten sind durchaus verschieden. Hiernach scheint es, als ob bei der mechanischen Schleiflade möglicherweise ein gewisser Einfluß des Anschlages auf das Schallbild vorliegt. Es ist denkbar, daß man bei Verwendung eines selbsttätigen Anschlagsmechanismus auch beim Lippenregister identisch gleiche Klangeinsätze erhält.

Eine Reihe wichtiger Einzelheiten ist in den Aufnahmen zu erkennen. So tritt beim Lieblich Gedackt 8' (Tafel II und IIIa) im ersten Toneinsatz für eine beträchtliche Zeit (bei C für

[1]) Das Typische wiederholt sich zumindest so gut, daß eine richtige zeitliche Zueinanderordnung einzelner, nacheinander aufgenommener Bilder möglich ist.

0,25 sec, bei c^1 für 0,05 sec) ein nahezu sinusförmiger Schwingungszug auf, dessen Frequenz etwa die $5^1/_2$fache des Grundtones ist. Im stationären Teil ist dieser Schwingungszug völlig verschwunden, auch der 5. Teilton selbst ist nur noch sehr schwach vorhanden, und es verbleiben im wesentlichen der Grundton und ganz schwach die Duodecime. Die Erklärung dieser Erscheinung dürfte wohl darin liegen, daß durch die besondere Intonation des Lieblich Gedackt in der Charlottenburger Schnitger-Orgel der zum stationären Schwingungszustand (einschließlich Erregung des Grundtones) erforderliche Mindest-Luftdruck erst im letzten Augenblick des Druckanstieges erreicht wird. Es ist nämlich bekannt, 1. daß der Druckanstieg in der Kernspalte verhältnismäßig langsam erfolgt; man hat dafür Zeiten bis zu 0,2 sec gemessen[1]), 2. daß bei langsamem Anwachsen des Anblasedruckes zunächst sprungweise und scheinbar ganz unsystematisch verschiedene höhere Teiltöne auftreten, die keineswegs harmonisch zu dem erst später bei weit höherem Druck hinzukommenden Grundton der Pfeife zu sein brauchen[2]). Bei dem vorliegenden Lieblich Gedackt 8′ wird offenbar durch Zusammenwirken von Mensur und Intonation einer dieser vorauslaufenden Teiltöne hinsichtlich Dauer und Stärke besonders bevorzugt. Zwischen Anblasedruck und Tonhöhe der Pfeife besteht kein einfacher, gesetzmäßiger Zusammenhang, wenn auch die Abhängigkeit an sich reproduzierbar ist.

Die eigenartige Ansprache dieses Lieblich Gedackt 8′ ist auch subjektiv ohne weiteres merkbar; wir hatten schon vor der objektiven Messung beobachtet, daß der Toneinsatz etwa mit dem $5^1/_2$fachen Teilton erfolgt[1]). Läßt man den Winddruck etwa durch Abstellen des Orgelmotors allmählich abfallen, so kann man an den meisten Orgelpfeifen die interessanten sprunghaften Veränderungen der Tonhöhe leicht subjektiv feststellen.

Für die Klangwirkung des Lieblich Gedackt 8′ ist die charakteristische Ansprache unbedingt von größter Bedeutung. Werden schnelle Tonfolgen gespielt, so nimmt der Toneinsatz einen verhältnismäßig großen Zeitraum ein. Er tritt dann subjektiv sehr deutlich neben dem stationären Klangteil in Erscheinung und verschafft so die Möglichkeit, in Art etwa eines Anschlages auch im mehrstimmigen Satz eine klare Linienführung herauszubringen[2]). Ähnliches gilt für den Prinzipal, wo die plötzlich herausspringenden hohen Teiltöne und Geräuschanteile einen anschlagähnlichen Effekt verursachen.

Die Zungenregister kommen, wie erwähnt, sehr rasch. Trompete und Posaune weisen im allgemeinen am Anfang nur eine einzelne gegen den eingeschwungenen Zustand qualitativ merklich verschiedene Periode auf, die vielleicht auf ein Anblasen des Luftresonators durch die im ersten Augenblick noch offenstehende Kehle zurückzuführen ist.

Sehr bemerkenswert sind die Einschwingvorgänge der Vox humana (Tafel VI a und VI b). Bei diesem Register erfolgt der Anstieg nicht ganz so rasch wie bei den anderen Zungenregistern. Es klingt zunächst verhältnismäßig

[1]) Nach im Institut für Schwingungsforschung ausgeführten Messungen (vgl. J. HAUSMANN, Diss. Techn. Hochsch. Aachen 1933). Es sei hier besonders auch darauf hingewiesen, daß in dieser Arbeit bereits der Einfluß der Ladensysteme und Ventilform auf die Einschwingvorgänge von Orgelpfeifen untersucht worden ist.

[2]) P. LUTZ, Beitr. Anat., Phys. usw. d. Ohres usw. 17 (1921), S. 1.

[1]) Wir verdanken Herrn Orgelbaumeister KARL KEMPER, Lübeck, einige interessante Bemerkungen über die Vorläufer beim Lieblich Gedackt 8′. Herr KEMPER sagte uns, daß diese Pfeifen offenbar bewußt so intoniert worden sind und daß er bereits auch seit vielen Jahren bei verschiedensten Registern ähnliche Ansprecheffekte geschaffen habe. Man könne Vorläufer erzielen, die in der Tonhöhe zwischen etwa dem 4. und 6. Partialton des stationären Grundtones liegen. Und zwar lasse sich der Vorläufer bei allen Pfeifen des betr. Registers nach Belieben z. B. als Terz (5. Partialton), als Quarte, als Quinte oder auch als unharmonischer Teilton intonieren, so daß also dieses Register im Klangeinsatz ein einheitliches, eigenartiges Gepräge erhalten kann.

[2]) Wir sind z. Z. damit beschäftigt, die Frage der Klangübergänge bei schnellem und langsamem Spiel an Oktavsieboszillogrammen zu untersuchen; wir werden demnächst über die Ergebnisse berichten können.

langsam ein Schwingungszug an, der nur geringe hohe Komponenten enthält. Wahrscheinlich entspricht dieser Schwingungszug einem Zustand, bei welchem die Amplitude der Zunge zu einem Aufschlagen auf die Kehle noch nicht ausreicht. Mit dem Augenblick, wenn erstmalig die Zunge aufschlägt, setzen dann die hohen Komponenten ein, und man erkennt von diesem Zeitpunkt an außerordentlich deutlich in den hohen Oktavbereichen die periodisch angestoßenen, gedämpft abklingenden Eigenschwingungen des Resonators; außerdem ist in diesem Augenblick der stationäre Zustand erreicht (Amplitudenbegrenzung des Generators durch das Aufschlagen). Diese Beobachtung ist auch durch die Bauart der Zungen erklärbar. Die Zungen der Trompete und Posaune sind verhältnismäßig kurz, breit und ziemlich kräftig, die der Vox humana dagegen länger, schmaler und dünner. Die verschiedene Bauart der Zungen bedingt dann grundsätzliche Verschiedenheiten in der Art des Aufschaukelns. Darauf hinzuweisen ist noch, daß die Frequenz des tiefen Einschwingvorganges ganz zu Beginn durchaus nicht mit der Frequenz des stationären Klangteiles übereinstimmt. Im Einsatz besitzt die Frequenz bei der Taste C einen Wert von 45, bei c^0 von 141, bei c^1 von 160, bei c^2 von 400 Hz gegenüber 61, 121, 242, 480 Hz im stationären Zustand. Es ist nicht ohne weiteres möglich, die Erscheinung sicher zu deuten; sie dürfte voraussichtlich durch Koppelungsvorgänge bedingt sein. Die geschilderte Art der Ansprache ist für die Klangwirkung der Vox humana von großer Bedeutung, was subjektiv ohne weiteres einleuchtend und den Orgelbauern und Organisten auch vielfach wohl bekannt ist.

Auch die stationären Klangteile der Vox humana sind sehr interessant. Periodisch angestoßene, hochliegende Formantschwingungen sind auf allen Bildern deutlich erkennbar. Im Auftreten solcher Formantschwingungen liegt offenbar die seit Jahrhunderten bekannte Ähnlichkeit dieses Registers mit der menschlichen Stimme[1])[2]). Trägt man die Spitzenamplituden der Pfeifen verschiedener Oktavlage in ein Diagramm ein (Abb. 3), so zeigt sich deutlich die Lage der einzelnen Resonanzbereiche. Die Resonatoren sind jeweils so abgestimmt, daß ihre Eigenschwingungen sehr viel höher liegen als der Grundton der betreffenden Pfeife, und mit steigendem Grundton rückt die Eigenschwingung entsprechend dem Mensurverlauf der Schallbecher gesetzmäßig in die Höhe.

Zusammenfassung

Über die Einschwingvorgänge von Orgelpfeifen wurden mittels Oktavsieboszillogrammen Untersuchungen durchgeführt. An den aufgenommenen Bildern prägt sich sehr charakteristisch die Eigenart der Ansprache der verschiedenen Register aus. So verläuft beispielsweise bei den Lippenregistern das Einschwingen im allgemeinen sehr langsam, während bei den Zungenregistern der Klang rasch aufgebaut ist. Die Eigenart der Einschwingvorgänge der verschiedenen Register wird eingehend besprochen und auf ihre Bedeutung für die Klangwirkung der Orgel hingewiesen.

---

[1]) Chr. Mahrenholz, Die Orgelregister, Kassel 1930, S. 165.

[2]) E. Thienhaus, Z. techn. Physik 15 (1934), S. 637. Der Toneinsatz der Vox humana ist übrigens von dem Toneinsatz der Vokale durchaus verschieden. Die bei der Vox humana auftretenden obertonarmen Vorläufer fehlen bei der menschlichen Stimme, d. h. die Formanten springen praktisch sofort an. Die Formanten werden eben schon bei der ersten Explosion der Stimmritze angestoßen, während sich die Zunge der Vox humana, wie erwähnt, allmählich aufschaukelt, bis sie die Kehle erstmalig ganz verschließt. Der Mechanismus beim Einsatz der Vox humana ähnelt also mehr demjenigen eines Explosivlautes aus der Gruppe der Mediae mit folgendem Vokal. Über Explosivlaute vgl. die auf S. 60 Anm. 1 genannte Arbeit.

Tabelle

Einschwingzeiten des Grundtones, der Oktave und der höheren Partialtöne der verschiedenen Orgelregister

a) Lippenpfeifen

Register	Tonhöhe[1]		Grundton		Oktave		Höhere Partialtöne Bemerkungen
	Taste	Frequenz	20% nach Sekunden	80%	20% nach Sekunden	80%	
Principal 8′ (Hauptwerk)[2]	C	61 Hz	0,28	0 49	0,11	0,30	Beim ersten Einsatz schwaches Geräusch für etwa 0,05 sec. Dann, von $t = 0{,}05$ sec bis $t = 0{,}15$ sec, tritt stark ein Teilton von der Frequenz 387 Hz auf, dieser Teilton liegt also etwas höher als der sechste Partialton. Im stationären Zustand sind im wesentlichen nur Grundton und Oktave vorhanden.
	c^0	122	0,09	0,17	0,026	0,1	Beim ersten Einsatz schwaches kurzes Geräusch während etwa 0,025 sec. Im stationären Zustand Grundton stärker als Oktave. Höhere Komponenten schwach.
	c^1	242	0,03	0,1	0,018	0,044	Beim ersten Einsatz sehr kurzes Geräusch während etwa 0,007 sec. Im stationären Zustand Grundton stärker als Oktave. Höhere Komponenten schwach.
	c^2	482	0,07	0,085	0,022	0,11	Beim ersten Einsatz starkes Geräusch (Bereich ca. 2400—4800 Hz) für etwa 0,04 sec. Im stationären Teil Oktave wesentlich stärker als der Grundton. Hohe Komponenten bis 9600 Hz deutlich erkennbar.
	c^3	960	0,033	0,046	0,013	0,075	Beim ersten Einsatz Geräusch (Bereich 2400—4800 und 4800—9600 Hz) für etwa 0,03 sec. Im stationären Teil sind Grundton und Oktave etwa gleich stark. Hohe Komponenten bis 9600 Hz erkennbar.
Lieblich Gedackt 8′ (Rückpositiv)	C	59	0,14	0,32	—	—	Oktave nicht vorhanden (gedackte Pfeife). Duodezime schwach erkennbar nach etwa 0,22 sec, 80% nach etwa 0,37 sec. Während des Einsatzes tritt (20% nach 0,035 sec, 80% nach 0,095 sec, Maximum bei etwa 0,12 sec, dann wieder langsam abnehmend) ein Teilton von etwa 307,5 Hz auf, dieser Teilton liegt also merklich höher als der 5. Partialton. Höhere Komponenten schwach.

[1]) Die Orgel steht mit C = 61 Hz um einen Halbton tiefer als es der normalen Stimmung (Kammerton $a^1 = 435$ Hz) entspricht.

[2]) Sämtliche Töne des Prinzipalregisters springen ziemlich unregelmäßig an. Verschiedene Anschläge stimmen durchaus nicht streng überein.

Register	Tonhöhe: Taste	Tonhöhe: Frequenz	Grundton: 20% nach Sekunden	Grundton: 80% nach Sekunden	Oktave: 20% nach Sekunden	Oktave: 80% nach Sekunden	Höhere Partialtöne Bemerkungen
Lieblich Gedackt 8′ (Rückpositiv)	c^0	122	0,06	0,14	—	—	Oktave nicht vorhanden (gedackte Pfeife). Duodezime nur schwach erkennbar. Während des Einsatzes sehr stark ein Teilton von 652 Hz; dieser Teilton liegt also merklich höher als der 5. Partialton (fast $5^1/_2$). Höhere Komponenten schwach.
	c^1	241	0,043	0,087	—	—	Oktave nicht vorhanden (gedackte Pfeife). Duodezime schwach erkennbar. Während des Einsatzes tritt (20% nach 0,02 sec, 80% nach 0,055 sec, Maximum bei etwa 0,06 sec, dann wieder rasch abnehmend) ein Teilton von 1280 Hz auf; dieser Teilton liegt also wesentlich über dem 5. Partialton (fast $5^1/_2$). Höhere Komponenten schwach.
	c^2	482	0,009	0,048	—	—	Höhere Komponenten so schwach, daß sichere Aussagen nicht möglich sind.
	c^3	ca. 980	0,002	0,01	—	—	
Floite dues 4′ (Rückpositiv)	c^0	244	0,052	0,096	—	—	Im ersten Einsatz kurzes Geräusch (bis etwa $t = 0{,}02$ sec). Höhere Partialtöne äußerst schwach.
	c^1	480	0,013	0,035	—	—	Im ersten Einsatz kurzes Geräusch (bis etwa $t = 0{,}018$ sec). Höhere Partialtöne äußerst schwach.
	c^2	ca. 970	0,01	0,023	—	—	Im ersten Einsatz kurzes Geräusch (bis etwa $t = 0{,}005$ sec). Höhere Partialtöne äußerst schwach.
	c^3	ca. 1890	0,012	0,018	—	—	Im ersten Einsatz kurzes Geräusch (bis etwa $t = 0{,}005$ sec). Höhere Partialtöne äußerst schwach.
b) Zungenpfeifen							
Posaune 16′ (Pedal) [1]	G	46	0,046	0,19	Nach etwa 2 Perioden (ca. 0,05 sec) fertig aufgebaut.		Im ersten Einsatz schwache Geräuschkomponente bis $t = 0{,}044$ sec. Der gesamte Klang ist nach etwa 2 Perioden (ca. 0,05 sec) aufgebaut, es macht sich nur noch ein gewisser Phasenwechsel bemerkbar. Nach 7 Perioden wird der Klang nahezu streng periodisch. Nur ganz geringe unharmonische Beimengungen. Höhere Komponenten stark bis 1200 Hz, schwächer bis 4800 Hz.

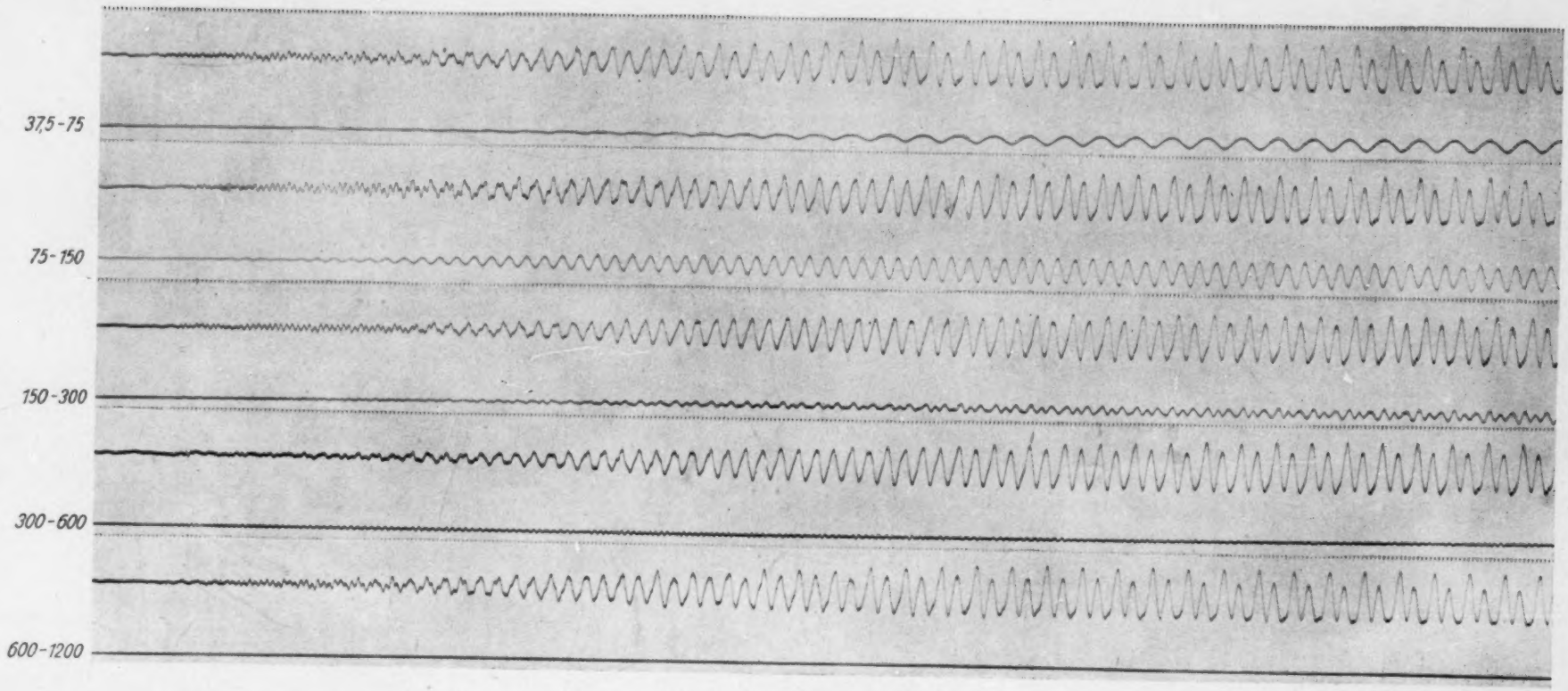
[1]) Der Klang war bei sämtlichen untersuchten Pfeifen der Zungenregister von Anschlag zu Anschlag auch im Einsatz nahezu identisch reproduzierbar.

Register	Tonhöhe		Grundton		Oktave	Höhere Partialtöne Bemerkungen
	Taste	Frequenz	20% nach Sekunden	80%		
Posaune 16′ (Pedal)	c^0	61	0,034	0,15	Nach etwa 2 Perioden (ca. 0,025 sec) fertig aufgebaut.	Im ersten Einsatz schwaches Geräusch bis $t = 0{,}018$ sec. Im stationären Teil Oktave schwächer als Grundton. Bereiche 150—300 Hz und 300—600 Hz stärker als Oktave. 600—1200 Hz schwach, 1200—2400 sehr schwach. Der gesamte Klang ist nach etwa 2 Perioden (etwa 0,03 sec) fertig aufgebaut.
Trompete 8′ (Pedal)	C	61	0,032	0,9	Nach einer Periode (0,016 sec.) voll aufgebaut.	Im ersten Einsatz schwaches Geräusch bis etwa $t = 0{,}018$ sec. Der Gesamtklang ist qualitativ nach etwa einer Periode (0,016 sec) aufgebaut, nur die Amplitude wächst noch etwas. Tonbereich 150—300, 300—600, 600—1200 sehr stark. 1200—2400 schwächer, aber noch deutlich zu erkennen. Auch die höchsten Komponenten sind im stationären Teil streng periodisch.
	c^0	121	Nach höchstens einer Periode voll aufgebaut.		Nach höchstens einer Periode voll aufgebaut.	Im ersten Einsatz nur sehr schwaches Geräusch. Der Gesamtklang ist qualitativ nach etwa 2 Perioden (ca. 0,016 sec) voll aufgebaut, nur die Amplitude wächst noch etwas. Höhere Komponenten bis etwa 2400 Hz ziemlich kräftig, im Oktavbereich 2400—4800 Hz nur noch schwach, aber sämtlich streng periodisch.
	c^1	240	Sehr rasch	ca. 0,05 sec	Setzt nach höchstens 1 Periode ein, 80% nach 0,045 sec.	Der Gesamtklang ist qualitativ nach etwa 4 Perioden aufgebaut, nur die Amplitude nimmt noch zu. Im stationären Teil Grundton schwach. Oktave etwas stärker, 600—1200 Hz stark, 1200—2400 Hz sehr stark, 2400—4800 Hz schwach, 4800—9600 Hz sehr schwach. Alles streng periodisch.
Hoboy 8′ (Hauptwerk)	C	61	Nach höchstens 1 Periode voll aufgebaut.		Nach höchstens 1 Periode voll aufgebaut.	Der Gesamtklang ist bereits nach 1 Periode qualitativ und quantitativ vollkommen aufgebaut. Am stärksten vertreten sind die Komponenten im Gebiet von 600—1200 Hz. Vollständig periodisch auch in sehr hohen Gebieten.
Cornett 2′ (Pedal) [1]	C	241	0,009	0,026	Beginnt sofort; nach ca. 0,023 sec. 80%.	Der Gesamtklang erreicht nach etwa 0,03 sec seine Maximalamplitude und fällt dann allmählich wieder etwas ab. Des Grundton hat im stationären Zustand 70%, die Oktave 30% des maximalen Wertes. Höhere Komponenten bis in den Bereich 1200—2400 Hz kräftig, dann rasch nachlassend. Gesamt-

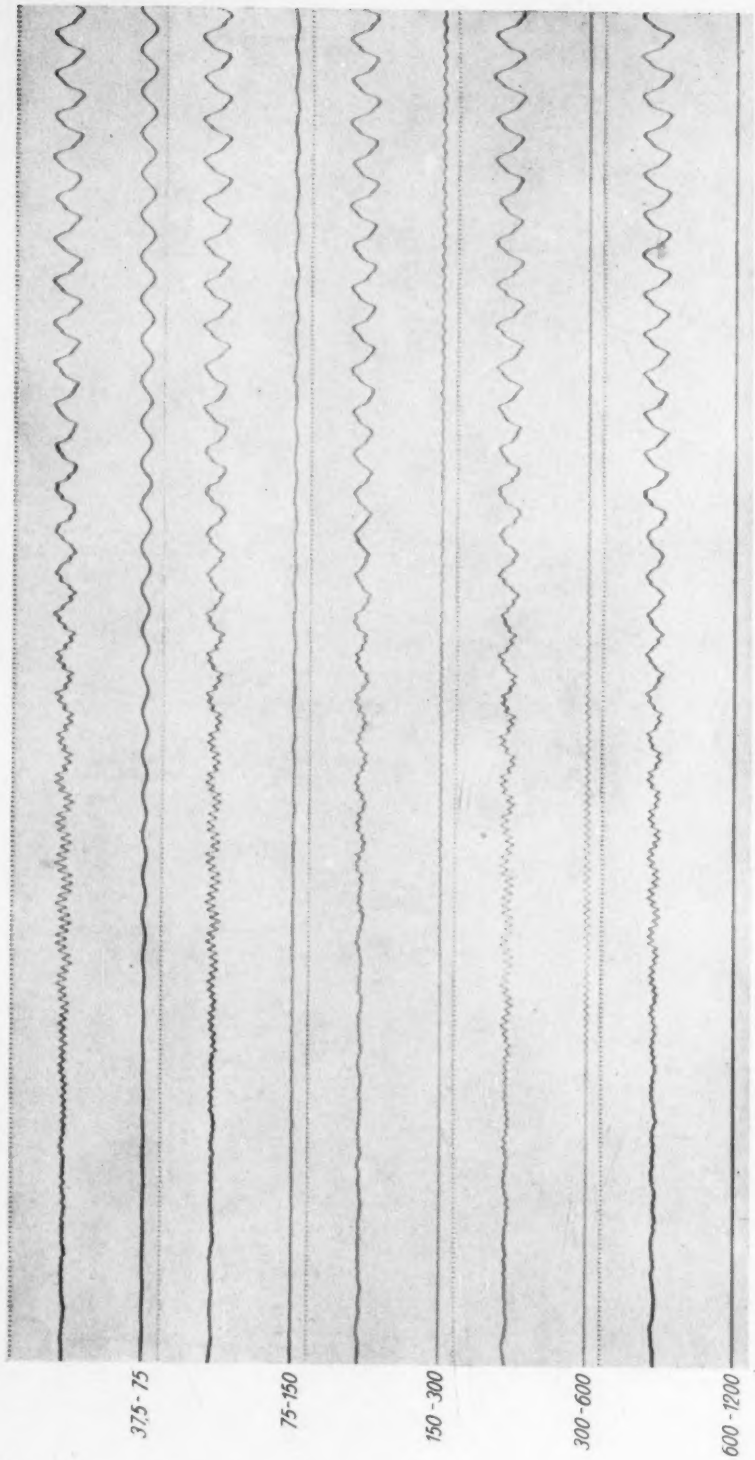
[1]) Es ist aus den Aufnahmen nicht sicher zu erkennen, ob nicht vor dem eigentlichen Klangeinsatz beim Cornett noch ein geräuschähnlicher Vorläufer liegt, die Zeitangaben sind daher nicht als ganz sicher zu betrachten.

Register	Tonhöhe		Grundton		Oktave	Höhere Partialtöne Bemerkungen
	Taste	Frequenz	20% nach	80% Sekunden		
Cornett 2' (Pedal)						Klang nach etwa 3 Perioden qualitativ beendet. Im stationären Teil streng periodisch.
	c^0	480	Springt sehr rasch an.		Beginnt sofort; 80% nach 0,014 sec.	Weitaus am stärksten der Bereich 1200—2400 Hz. Im stationären Teil streng periodisch.
	c^1	965	0,009	0,016	Beginnt sofort; 80% nach 0,2 sec.	Am stärksten das Gebiet 2400—4800 Hz Das Gebiet von 4800—9600 Hz ist noch ebenso stark wie der Grundton. Im stationären Teil streng periodisch.
Vox humana 8' (Hauptwerk)						Bei den Vox humana-Aufnahmen ist durchweg vor dem eigentlichen Klangeinsatz ein Schwingungszug, der vorwiegend aus tiefen Komponenten besteht, zu erkennen. Der Schwingungszug ist nur angenähert harmonisch[1]).
	C	61	Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.		Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.	Höhere Teiltöne sind mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut. Bis in den Bereich 4800—9600 Hz durchweg stärker als der Grundton. Im stationären Teil rein periodisch.
	c^0	121	Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.		Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.	Vor dem eigentlichen Klangeinsatz ist ein nicht vollständig periodischer Schwingungszug von etwa 0,05 sec Dauer zu erkennen. Die Bereiche 300—600, 600—1200, 1200—2400 Hz sind im stationären Klangteil durchweg stärker als der Grundtonbereich 75—150 Hz. 2400—4800 Hz sind etwa ebenso stark wie der Grundtonbereich. Der stationäre Klangteil ist rein periodisch.
	c^1	242	Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.		Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.	Vor dem eigentlichen Klangeinsatz ist ein nicht vollständig periodischer Schwingungszug von etwa 0,08 sec Dauer zu erkennen. Die Bereiche 300—4800 Hz sind im stationären Klangteil durchweg stärker als der Grundtonbereich 150—300 Hz. Der Bereich 4800—9600 Hz ist ebenso stark wie der Grundtonbereich. Der stationäre Klangteil ist rein periodisch.
	c^2	480	Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.		Mit dem eigentlichen Klangeinsatz sehr rasch aufgebaut.	Vor dem eigentlichen Klangeinsatz ist ein nicht vollständig periodischer Schwingungszug von etwa 0,03 sec Dauer zu erkennen. Die Bereiche von 1200—4800 Hz sind wesentlich stärker als der Grundtonbereich 300—600 Hz. Der Bereich 4800–9600 Hz ist etwa ebenso stark wie der Grundtonbereich. Der stationäre Klangteil ist rein periodisch.

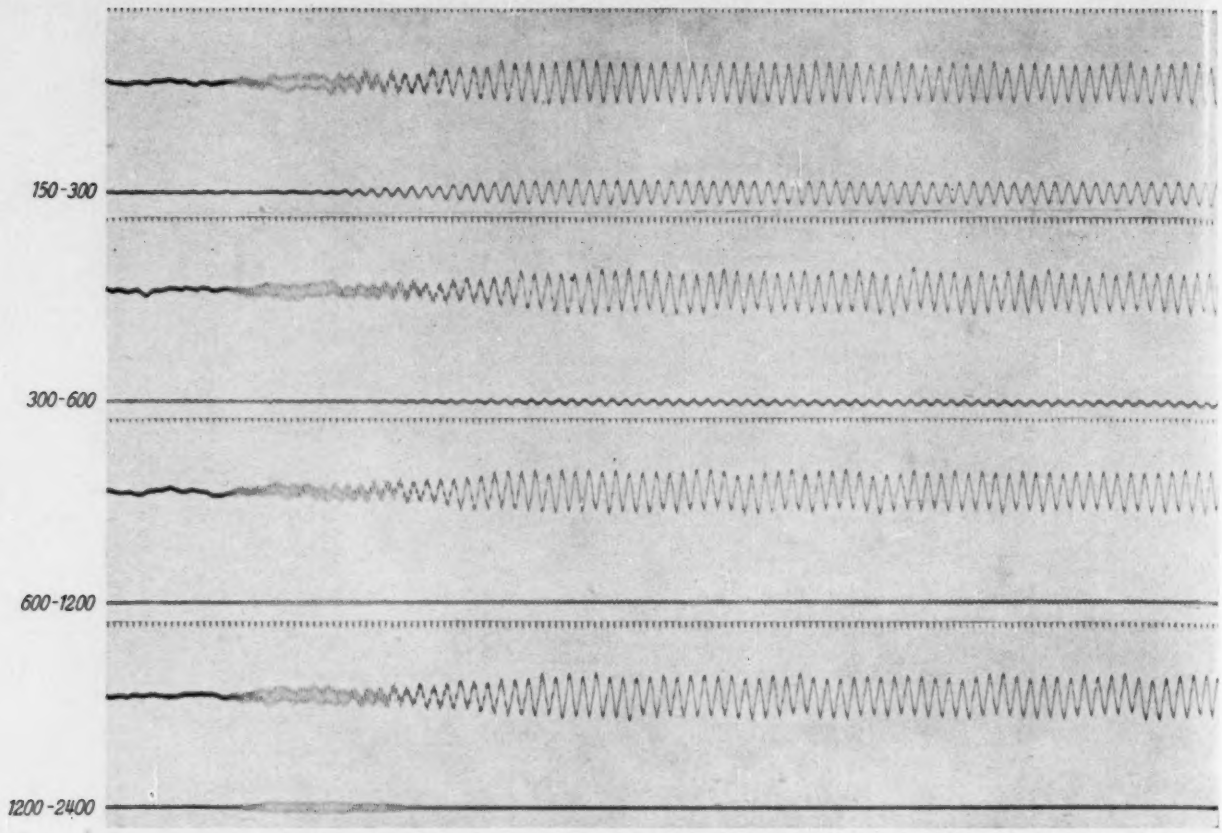
[1]) Vgl. hierzu die Angaben auf S. 63.



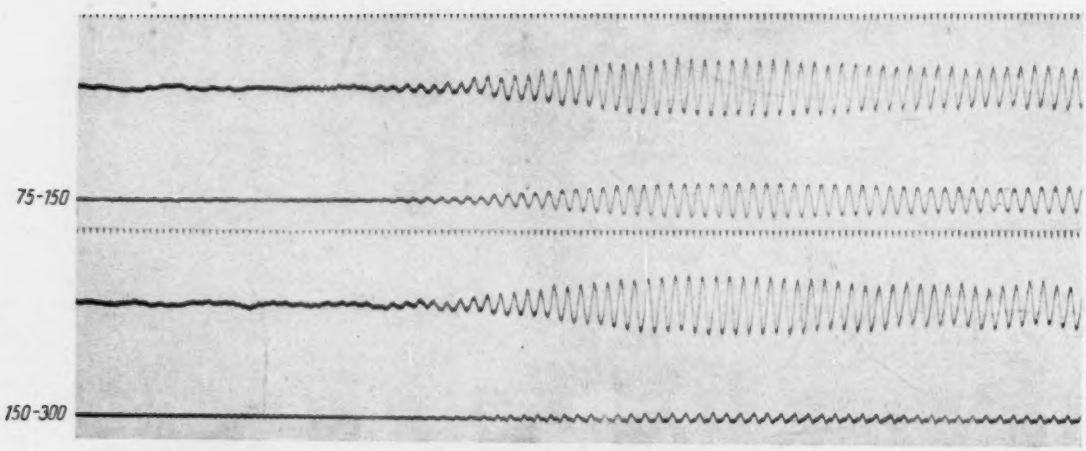
Tafel I. Prinzipal 8′, C



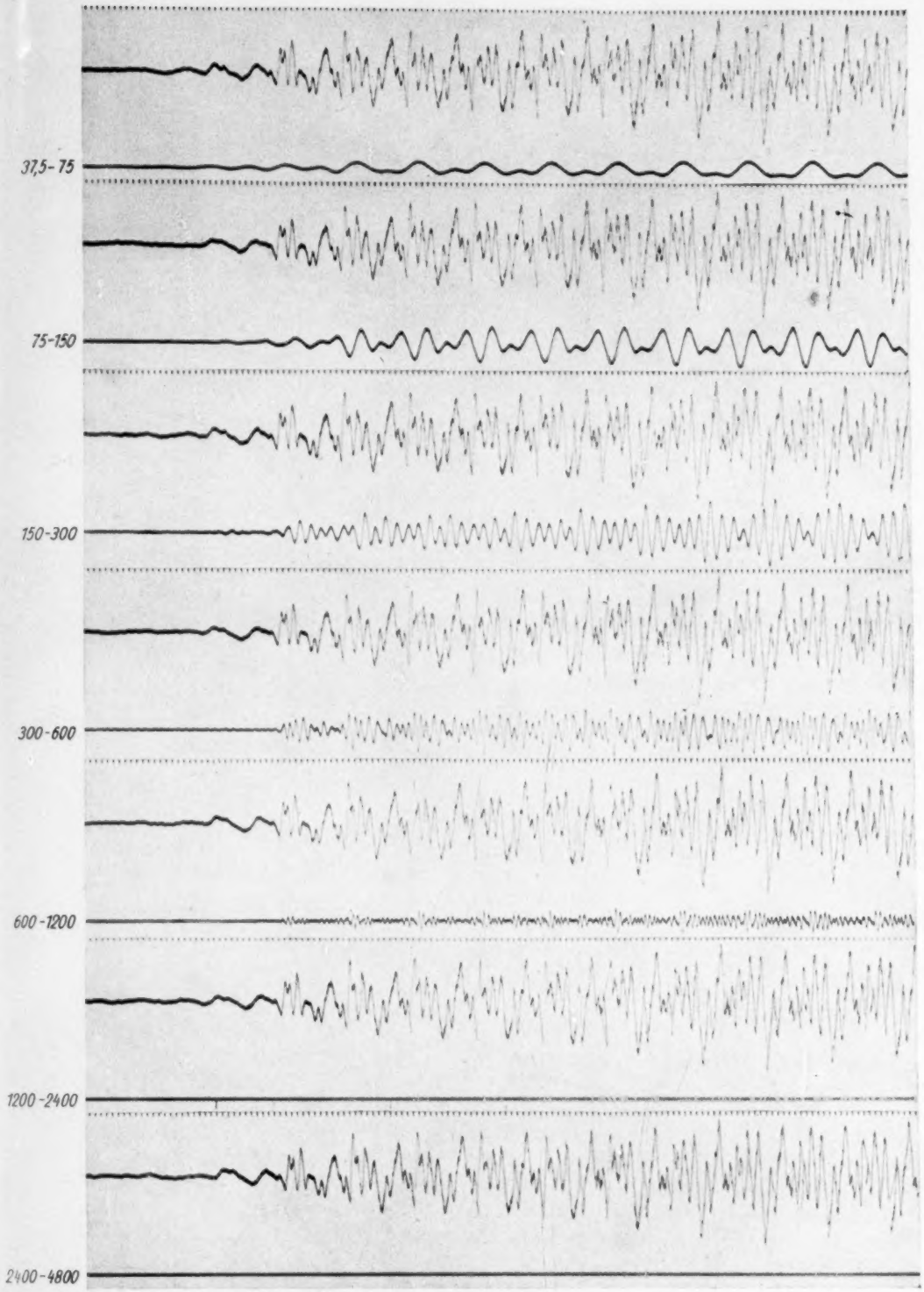
Tafel II. Lieblich Gedackt 8', C



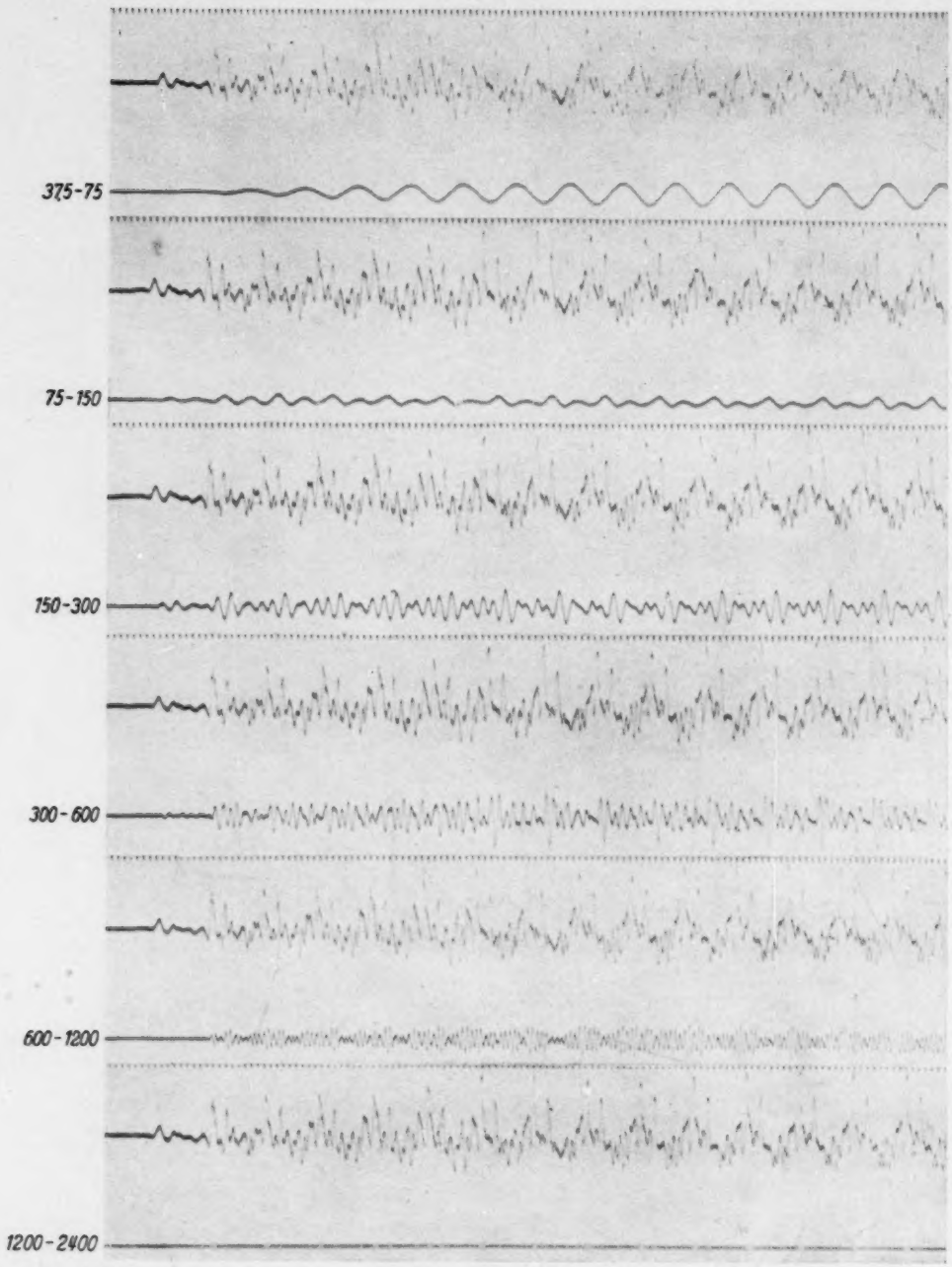
Tafel IIIa. Lieblich Gedackt 8′, c^1



Tafel IIIb. Floite dues 4′, c^0

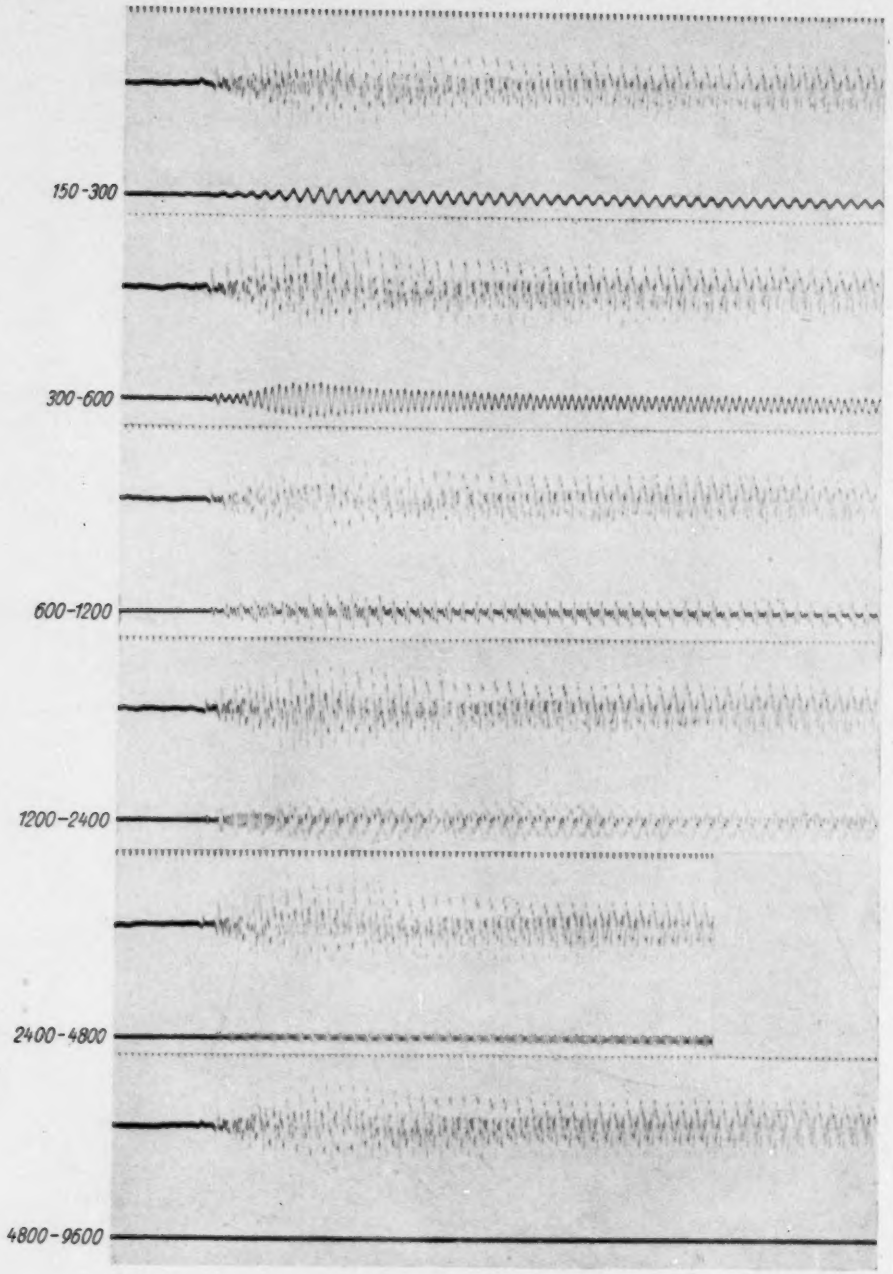


Tafel IVa. Posaune 16′, G

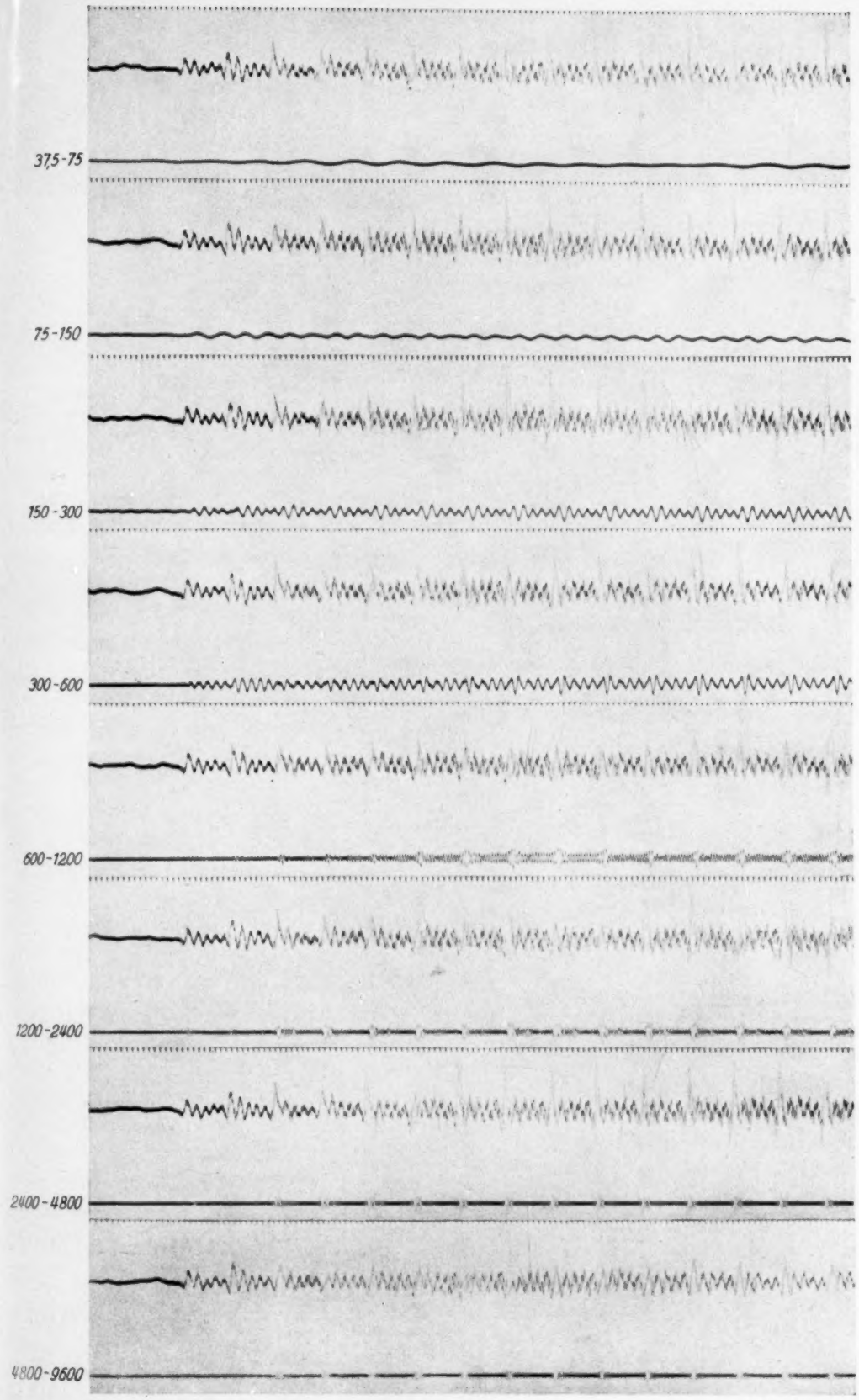


Tafel IV b. Trompete 8', C

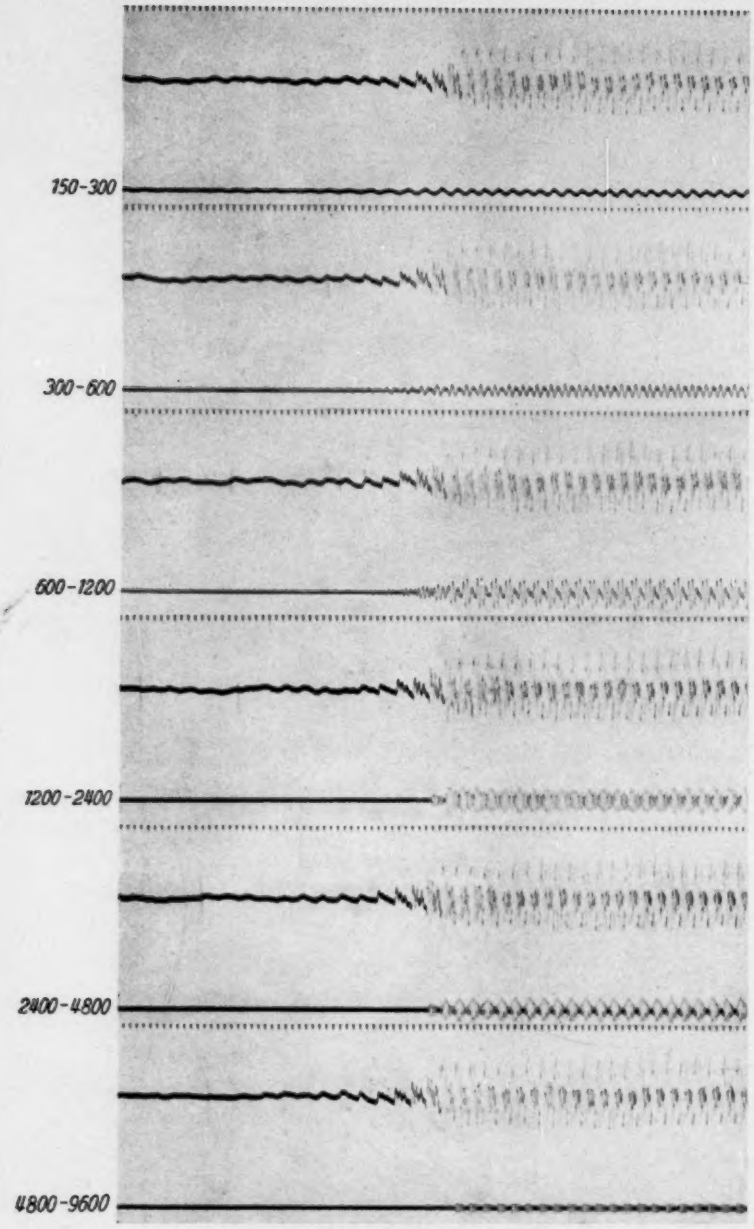
Tafel Va. Hoboy 8', C



Tafel Vb. Cornett 2', C



Tafel VIa. Vox humana 8'. C



Tafel VIb. Vox humana 8′, c^1

(Eingegangen 10. September 1936.)

Experimentelle Untersuchungen an einer Klarinette[1])

Von Volker Aschoff

Mit 11 Abbildungen

Einleitung

Die neuere Entwicklung der technischen Akustik hat durch das erhöhte Interesse an eingehender Kenntnis der physikalisch-akustischen Schwingungsgesetze und durch die Schaffung neuer Meßmethoden zu weitgehenden Untersuchungen an Musikinstrumenten angeregt. Während dabei bis jetzt die Saiteninstrumente eine bevorzugte Beachtung gefunden haben, soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Kenntnis der Schwingungsvorgänge an einem Blasinstrument geben.

Nach der Art des Anblasmechanismus kann man die Blasinstrumente in Lippen- und Zungenpfeifen einteilen. Beide Arten gehorchen den Gesetzen gekoppelter schwingungsfähiger Systeme, die durch den Steuermechanismus der Schwingung einerseits und den mit ihm gekoppelten, als Resonator wirkenden Lufthohlraum andererseits gebildet werden. Die resultierende Schwingung zweier solcher gekoppelten Systeme hängt in ihrer Frequenz von den Eigenfrequenzen der Einzelsysteme, von deren Dämpfungen und von der Kopplung zwischen beiden Systemen ab; im wesentlichen wird die resultierende Frequenz von der Eigenfrequenz des schwächer gedämpften Systemes bestimmt (M. Wien[2])). Dies ist bei den eigentlichen Zungenpfeifen der Orgel die schwingende Zunge, deren Frequenz nur in geringen Grenzen von der Eigenfrequenz des angekoppelten Lufthohlraumes beeinflußt wird. Die Wirkungsweise dieser Pfeife ist von Vogel[1]) eingehend experimentell und theoretisch behandelt worden.

Der umgekehrte Fall liegt vor, wenn die schwingende Luftmasse schwächer gedämpft ist als die Zunge, die resultierende Frequenz also vorwiegend durch den Lufthohlraum bestimmt wird; dies trifft für die Holzblasinstrumente zu, die mit Hilfe eines oder zweier Rohrblätter angeblasen werden.

Unter diesen Instrumenten nimmt die Klarinette, die in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden soll, eine Sonderstellung ein: sie „überbläst" nicht in die Oktave, sondern im Gegensatz zu allen anderen Blasinstrumenten in die Duodezime. Ihr Mundstück besteht aus nur einem und zwar aufschlagendem Rohrblatt. Die Bohrung des Rohres verläuft bis auf ein kurzes Stück des offenen Endes zylindrisch. Eine Besonderheit des Mundstückes ist, daß der zum Blasen notwendige Luftdruck mit zunehmender Tonhöhe (ebenfalls im Gegensatz zu anderen Blasinstrumenten) abnimmt (Charlton W. H. Foord[2])).

Diese Besonderheiten rechtfertigen das erhöhte Interesse, das der Klarinette von der Physik her entgegengebracht wird. Sie wurde von verschiedener Seite untersucht; die ausführlichste theoretische Behandlung ihrer Schwingungsvorgänge stammt von P. Das[3]),

[1]) Von der Technischen Hochschule Karlsruhe genehmigte Dissertation.

[2]) M. Wien, Rückwirkung eines resonierenden Systems, Ann. Physik 61 (1897), S. 151.

[1]) H. Vogel, Die Zungenpfeife als gekoppeltes System, Ann. Physik 62 (1920), S. 247.

[2]) C. W. H. Foord, Air Pressures used in Playing Reed Instruments, Philos. Mag. 27 (1914), S. 271.

[3]) P. Das, Theory of the Clarinet, Indian J. Physics 6 (1931), S. 225.

der im wesentlichen zu folgenden Ergebnissen kommt:

1. Der akustische Widerstand des steifen Rohrblattes ist so groß, daß das Mundstück der Klarinette als annähernd geschlossenes Ende einer zylindrischen Pfeife gelten kann. Eine solche gedackte Pfeife kann aber außer in ihrer Grundfrequenz nur in ungradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz schwingen.

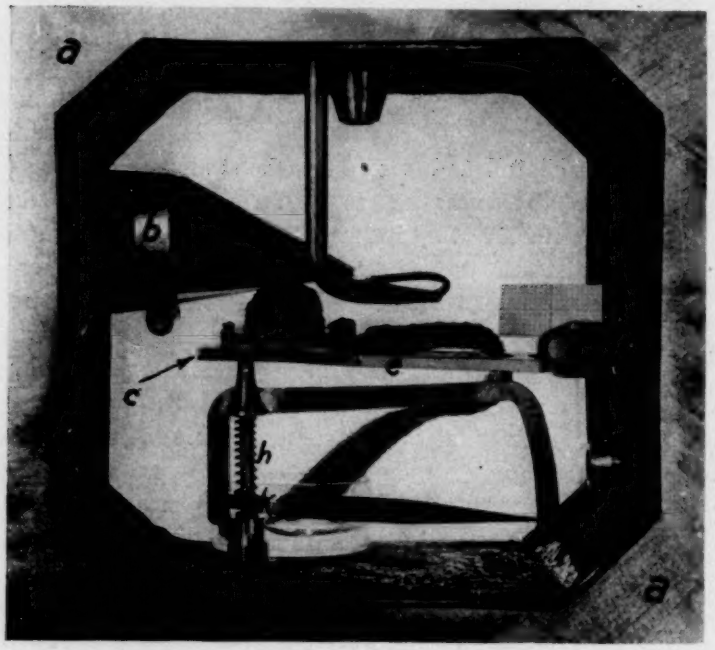


Abb. 1. Inneres der zum Blasen der Klarinette benutzten Anordnung

2. Die bei der Analyse von Klarinettenklängen durch BLAIKLEY und MILLER[1]) gefundenen, allerdings sehr schwachen Amplituden der zweiten und vierten Harmonischen rühren daher, daß der Mundstückwiderstand nur endliche Werte annehmen kann, das Mundstück also kein völlig geschlossenes Ende darstellt.
3. Das starke Auftreten des 7., 8., 9. und 10. Obertones in den Analysen von BLAIKLEY und MILLER wird auf die Eigenfrequenz der Zunge zurückgeführt. Daß dieses Frequenzband so breit ist, wird aus der Inkonstanz der Eigenfrequenz der Zunge während einer Periode der Grundschwingung erklärt. Die Länge des freischwingenden Blattendes und damit dessen Eigenfrequenz ändert sich, da das Blatt sich im Verlauf seiner Bewegung ein kürzeres oder längeres Stück auf der geschweiften Bahn des Mundstückes auflegt.

[1]) D. C. MILLER, Science of Musical Sounds.

In Ergänzung und Erweiterung dieser früheren Untersuchungen soll in der vorliegenden Arbeit über eine Apparatur berichtet werden, die ein künstliches Anblasen der Klarinette unter meßbaren Bedingungen ermöglicht, sowie das Ergebnis der bisher mit dieser Anordnung durchgeführten Untersuchungen mitgeteilt werden.

Vorversuche

Um auf experimentellem Wege weitere Aufschlüsse über die physikalischen Erscheinungen der tönenden Klarinette gewinnen zu können, war es notwendig, die normalerweise von Mund und Lunge des Bläsers erfüllten Funktionen durch eine künstliche Anblasvorrichtung willkürlich regelbar und vor allem meßbar zu ersetzen. Da keinerlei Erfahrungen über die Möglichkeiten eines solchen künstlichen Anblasens vorlagen, wurden eine größere Reihe von Vorversuchen nötig, um Aufschluß über die aufzuwendenden Drücke, die notwendigen Grenzen der Regelbarkeit sowie über das günstigste Material für die Lippe und deren Feuchthaltung zu gewinnen.

Auf Grund der in den ersten Versuchen gewonnenen Erfahrungen wurde dann die in den Abb. 1 und 2 gezeigte Anblasvorrichtung entwickelt.

Sie besteht im wesentlichen aus einem gußeisernen Gehäuse *a*, dessen offene Seiten durch Glasplatten abgedeckt werden. In dies Gehäuse ragt das Mundstück *b* der Klarinette hinein, die Dichtung an dieser Stelle geschieht mittels einer Pertinaxscheibe, die satt auf das dicke Ende des konisch verlaufenden Mundstückes aufgepaßt ist und auf eine glattgedrehte Fläche der Gehäuseaußenwand mit Schrauben aufgepreßt werden kann.

Die Lippe *c* besteht aus einer kleinen Messingschneide, über die ein Polster aus Schwammgummi *d* geschoben ist. Sie wird von einem Hebelarm *e* getragen, dessen Drehpunkt *f* verschiebbar gelagert ist, so daß der Angriffspunkt der Lippe entlang dem Rohrblatt verschoben werden kann. Die Feuchthaltung der Lippe, die sich bei den Vorversuchen zur zusätzlichen Dämpfung des Rohrblattes als notwendig erwiesen hatte, geschieht mittels eines Dochtes *g*, der in einen Wassernapf taucht. Der Druck, mit dem die Lippe auf das Blatt wirkt, wird durch eine Spiralfeder *h* erzeugt, die mit Hilfe einer feingängigen Schraube *i* mehr oder weniger zusammengedrückt werden kann; eine Hebelübersetzung *k* zeigt die jeweilige Verkürzung der Feder auf einer Skala *l* an. Bei der Eichung mußte berücksichtigt werden, daß der Abstand des Angriffspunktes der Druckfeder vom Drehpunkt der Lippe sich für verschiedene Lippenstellungen ändert.

Die notwendige Druckluft lieferte eine rotierende Ölpumpe von LEYBOLD, die über ein Glaswollfilter und einen Windkessel von 50 l Inhalt auf einen Wassergasometer arbeitete, dessen Schwimmer die Drehzahl des Pumpenmotors steuerte; so war eine weitgehende Konstanz des Gasometerinhaltes und damit des zur Verfügung stehenden Druckes gewährleistet. Die Druckregelung erfolgte durch einen Quetschhahn in der Zuleitung zur Blasvorrichtung; dies bedingt zwar einen von der jeweiligen durchströmenden Luftmenge abhängigen Druckabfall, erwies sich aber trotzdem als die praktischste Lösung. Der Luftdruck am Mundstück wurde durch ein am Gehäuse der Anblasvorrichtung angeschlossenes gewöhnliches Wassermanometer gemessen.

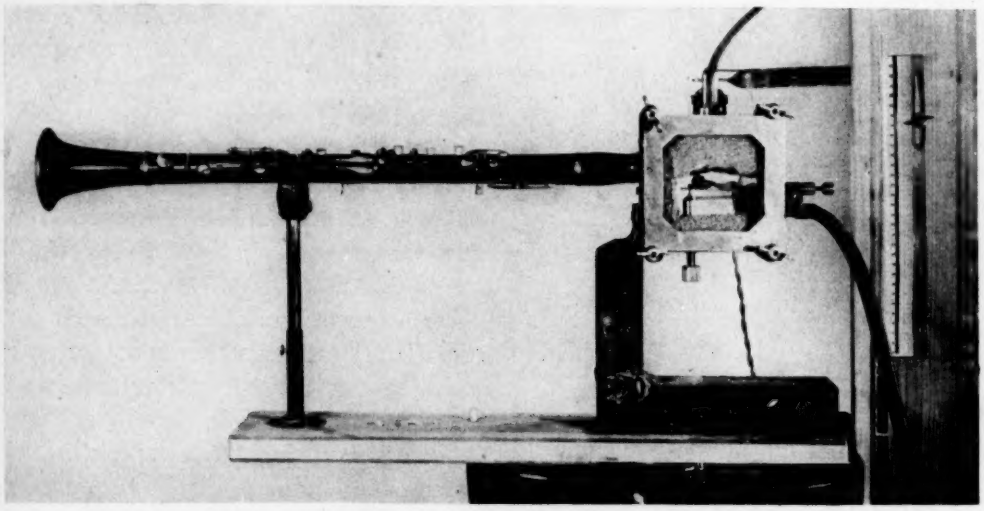


Abb. 2. Endgültige Versuchsanordnung

Eine besondere Zusatzeinrichtung ermöglichte die kapazitive Abtastung der Rohrblattbewegung in einer Anordnung, wie sie von H. BACKHAUS[1]) für die Abtastung von Geigenkörpern angegeben worden ist (Methode der halben Resonanzhöhe).

Um einen Einfluß des Innenraumes der Blasvorrichtung auf den Schwingungsvorgang der Klarinette möglichst zu vermeiden, wurde der freie Innenraum weitgehend mit Schwammgummi ausgekleidet. Es erwies sich dies bei den Vorversuchen als günstig und entspricht ja auch dem stark gedämpften Zustand der Mundhöhle des Bläsers.

[1]) H. BACKHAUS, Über Strahlungs- und Richtwirkungseigenschaften von Schallstrahlern. Z. techn. Physik 9 (1928), S. 491.

Im Rahmen der Vorversuche wurde auch die Richtwirkung der Klarinette in großen Zügen untersucht und dabei gefunden, daß die Teiltöne höherer Frequenz im wesentlichen nur in der Achsenrichtung der Klarinette abgestrahlt werden. Aus diesem Grunde wurde späterhin bei akustischen Aufnahmen das Mikrophon jeweils in der Achsenrichtung des Instrumentes aufgestellt, der Abstand vom offenen Ende betrug dabei etwa 1,75 m.

Zusammenfassend kann über die Vorversuche gesagt werden, daß es nach Einführung einer genügend weichen Lippe gelang, mit dem beschriebenen Gerät sämtliche Töne der Klarinette mit großer Konstanz und für das Ohr gut klingend anzublasen. Der Luftdruck entspricht dem von Foord für natürliches Blasen angegebenem. Analysen von Oszillogrammen der künstlich geblasenen Töne entsprechen den Angaben von Blaikley-Miller, Meyer-Buchmann[1]) und Stumpf[2]). Oszillogramme von Klängen, die mit dem gleichen Mundstück einmal von einem Bläser, dann mit der Anblasvorrichtung geblasen worden waren, zeigen weitgehende Übereinstimmung. Es erscheint also berechtigt, den Anblasmechanismus im Gerät als ausreichend identisch mit dem natürlichen anzusehen.

Die folgenden Untersuchungen wurden an einer *B*-Klarinette mit 13 Klappen der Firma O. Adler, Markneukirchen, durchgeführt. Die Grifflöcher konnten durch konische Gummistopfen verschlossen, die Klappen durch kleine Holzkeile offengehalten werden.

Die im Anblasgerät eingestellten Werte werden in den später angeführten Tabellen folgendermaßen angegeben:

Der Lippendruck in g.
Die Lippenstellung in mm Abstand vom freien Ende des Rohrblattes.
Der Luftdruck in cm Wassersäule.
Die Luftmenge in l pro sec.

[1]) Meyer-Buchmann, Die Klangspektren der Musikinstrumente, S.-B. preuß. Akad. Wiss. 1931.
[2]) C. Stumpf, Die Sprachlaute.

Experimentelle Untersuchungen

1. *Überblaserscheinungen.*

Mit der im vorstehenden beschriebenen Ve suchsanordnung sollte nun vor allem der Vo gang beim „Überblasen" näher untersuch werden.

Hier muß gleich eingeschoben werden, da der von der Flöte herrührende Ausdruck „übe blasen" für die Klarinette nicht zutreffend is Er wurde aber beibehalten, da er dem Sprach gebrauch entspricht.

In der Literatur ist bisher über die Überbla erscheinung der Klarinette nur wenig zu finde Helmholtz[1]) gibt bei Erwähnung der Klar nette lediglich an, daß durch verändertes An blasen vom Grundton auf die Duodezime ode höhere Terz übergegangen werden kann. In de sonstigen Literatur über Musikinstrumente fin det man meist nur die Angabe, daß die Klar nette durch erhöhten Druck auf das Rohrblat überblasen werden könne[2]). Betrachtet man abe die Klarinette als ein System gekoppelte schwingungsfähiger Gebilde, so erscheint e sehr unwahrscheinlich, daß tatsächlich eine E höhung des Lippendruckes eine höhere Fre quenz hervorrufen könne; bedeutet doch de Druck der Lippe auf das Rohrblatt mit Siche heit eine zusätzliche Dämpfung des Blattes. M zunehmender Dämpfung kann aber der Einflu der hohen Eigenfrequenz des Blattes auf di resultierende Frequenz der akustischen Schwi gung höchstens abnehmen, keinesfalls aber ein wesentliche Erhöhung dieser Frequenz be wirken.

Tatsächlich zeigen die mit der Anblasvor richtung ausgeführten Untersuchungen auc ein völlig anderes Verhalten. Ein Überblase in höhere Frequenzen tritt nur bei Verringerun des Blas- und Lippendruckes auf. Ehe aber übe die hierüber ausgeführten Versuche näher be richtet werden soll, muß auf eine besonde Schwierigkeit bei der Durchführung und vo allem bei der Auswertung der Versuche hinge wiesen werden. Die für die Klarinette benutzte

[1]) Helmholtz, Die Lehre v. d. Tonempfindunge
[2]) W. Altenburg, Die Klarinette, ihre Ent stehung und Entwicklung usw. Heilbronn 1904, S. 1

Rohrblätter sind ein pflanzliches Produkt, das als solches niemals in mehreren Stücken genau identisch sein kann. Auch ändern sich die Eigenschaften der Blätter während der Benutzung sehr stark, ein einzelnes Blatt konnte jeweils nur für eine beschränkte Dauer zu Messungen benutzt werden. Aus diesem Grunde ist es nicht möglich, Meßwerte, die mit verschiedenen Blättern gefunden wurden, direkt miteinander zu vergleichen, oder allgemeingültige Absolutwerte für bestimmte Eigenschaften anzugeben. Es wurde deshalb in der vorliegenden Arbeit bewußt darauf verzichtet, etwa eine quantitativ strenge Übereinstimmung des Klarinettensystems mit den Gesetzen gekoppelter Schwingungskreise aufzuzeigen. Untersucht wurden jeweils nur die Änderungen bestimmter Vorgänge bei Änderung der Anblasbedingungen. Trotz dieser Einschränkung konnten dabei einige Gesetzmäßigkeiten aufgefunden werden, die das Verhalten der Klarinette besser als bisher zu erklären gestatten.

Unter Berücksichtigung dieser Eigenart der Klarinette wurde mit der schon früher erläuterten Versuchseinrichtung folgendes gefunden:

Ändert man beim Blasen der Klarinette den Luftdruck oder den Lippendruck oder beide, so springt mit abnehmendem Druck der Ton plötzlich in eine meist viel höhere Frequenz um. Dabei treten deutlich Zieherscheinungen auf, d. h.: springt der Ton während einer Druckminderung bei einem bestimmten Druck um, so kann man den Druck jetzt wieder steigen lassen, ohne daß der Ton sofort in seine alte Frequenz zurückspringt; wenn sich ein stabiler Schwingungszustand eingestellt hat, muß jeweils eine erhebliche Änderung der äußeren Umstände eintreten, um einen anderen Schwingungszustand zu erreichen.

Bei allen Versuchen zeigte die Klarinette bei Druckminderung das Bestreben, sich in den höheren Frequenzgebieten, etwa zwischen 1000 und 1700 Hz, zu erregen. Ein Überblasen in die Duodezime war nur in wenigen Fällen zu erreichen, am ehesten bei den höheren Grundtönen. Um einen Überblick über die auftretenden Frequenzen zu erhalten, wurden einige Reihen von Frequenzmessungen mit 2 verschiedenen Rohrblättern durchgeführt. Die Tonhöhe wurde durch Vergleich mit einem geeichten Schwebungstonsender ermittelt; eine gewisse Ungenauigkeit dieser Meßmethode lag in der Temperaturempfindlichkeit des Senders. Durch häufige Kontrolle eines Eichpunktes mit der zugehörigen Stimmgabel konnte dieser Fehler aber in sehr engen Grenzen gehalten werden.

Gemessen wurden die Frequenzen, die sich bei gleichbleibender Klappenstellung durch reine Änderung des Lippen- und Blasdruckes einstellten. Die Versuche wurden mit 2 verschiedenen Blättern und bei verschiedener Stellung der Lippe durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in den Kurvenblättern 1 und 2 aufgetragen. Es zeigt sich folgendes Bild: je tiefer der Grundton, desto höher liegen die überblasenen Töne. Ein Überblasen in die Duodezime ist meist erst oberhalb etwa $c' = 258$ Hz möglich. Andererseits lassen sich um so tiefere Grundtöne in die Duodezime überblasen, je näher am freien Ende die Lippe angreift. Alle überblasenen Töne liegen auf Kurven, die dem Frequenzverlauf ganzzahliger Vielfacher der Grundtöne parallel verlaufen, ohne jedoch in ihrer Frequenz genau mit ganzzahligen Vielfachen des jeweiligen Grundtones übereinzustimmen.

Zwischen Blatt 1 und Blatt 2 besteht insofern ein Unterschied, als mit Blatt 2 etwas leichter in die Duodezime zu überblasen war als mit Blatt 1. Blatt 2 war etwas dünner geschabt als Blatt 1, die mit Blatt 2 geblasenen Töne waren aber nicht immer so stabil wie die mit Blatt 1 erzeugten.

Diese Ergebnisse können folgende Erklärung finden: Ein Überblasen tritt ein, wenn Lippen- oder Luftdruck vermindert wird. Der Druck auf das Blatt durch die Lippe oder durch den statischen Druck der Luft auf die freie Fläche des Blattes bedeuten eine Dämpfung des Blattes; eine Verringerung dieser Dämpfung bewirkt demnach ein Überblasen (s. Tabelle 1 und 2).

Die Tabellen 1 und 2 enthalten neben den Überblasfrequenzen auch die zu den einzelnen Tönen gehörenden Blas- und Lippendrucke. (Bei Tönen, die sich in verschiedene Frequenzen überblasen ließen, sind die überblasenen Töne

Im Rahmen der Vorversuche wurde auch die Richtwirkung der Klarinette in großen Zügen untersucht und dabei gefunden, daß die Teiltöne höherer Frequenz im wesentlichen nur in der Achsenrichtung der Klarinette abgestrahlt werden. Aus diesem Grunde wurde späterhin bei akustischen Aufnahmen das Mikrophon jeweils in der Achsenrichtung des Instrumentes aufgestellt, der Abstand vom offenen Ende betrug dabei etwa 1,75 m.

Zusammenfassend kann über die Vorversuche gesagt werden, daß es nach Einführung einer genügend weichen Lippe gelang, mit dem beschriebenen Gerät sämtliche Töne der Klarinette mit großer Konstanz und für das Ohr gut klingend anzublasen. Der Luftdruck entspricht dem von FOORD für natürliches Blasen angegebenem. Analysen von Oszillogrammen der künstlich geblasenen Töne entsprechen den Angaben von BLAIKLEY-MILLER, MEYER-BUCHMANN[1]) und STUMPF[2]). Oszillogramme von Klängen, die mit dem gleichen Mundstück einmal von einem Bläser, dann mit der Anblasvorrichtung geblasen worden waren, zeigen weitgehende Übereinstimmung. Es erscheint also berechtigt, den Anblasmechanismus im Gerät als ausreichend identisch mit dem natürlichen anzusehen.

Die folgenden Untersuchungen wurden an einer *B*-Klarinette mit 13 Klappen der Firma O. Adler, Markneukirchen, durchgeführt. Die Grifflöcher konnten durch konische Gummistopfen verschlossen, die Klappen durch kleine Holzkeile offengehalten werden.

Die im Anblasgerät eingestellten Werte werden in den später angeführten Tabellen folgendermaßen angegeben:

Der Lippendruck in g.
Die Lippenstellung in mm Abstand vom freien Ende des Rohrblattes.
Der Luftdruck in cm Wassersäule.
Die Luftmenge in l pro sec.

[1]) MEYER-BUCHMANN, Die Klangspektren der Musikinstrumente, S.-B. preuß. Akad. Wiss. 1931.
[2]) C. STUMPF, Die Sprachlaute.

Experimentelle Untersuchungen

1. *Überblaserscheinungen.*

Mit der im vorstehenden beschriebenen Versuchsanordnung sollte nun vor allem der Vorgang beim „Überblasen" näher untersucht werden.

Hier muß gleich eingeschoben werden, daß der von der Flöte herrührende Ausdruck „überblasen" für die Klarinette nicht zutreffend ist. Er wurde aber beibehalten, da er dem Sprachgebrauch entspricht.

In der Literatur ist bisher über die Überblaserscheinung der Klarinette nur wenig zu finden. HELMHOLTZ[1]) gibt bei Erwähnung der Klarinette lediglich an, daß durch verändertes Anblasen vom Grundton auf die Duodezime oder höhere Terz übergegangen werden kann. In der sonstigen Literatur über Musikinstrumente findet man meist nur die Angabe, daß die Klarinette durch erhöhten Druck auf das Rohrblatt überblasen werden könne[2]). Betrachtet man aber die Klarinette als ein System gekoppelter schwingungsfähiger Gebilde, so erscheint es sehr unwahrscheinlich, daß tatsächlich eine Erhöhung des Lippendruckes eine höhere Frequenz hervorrufen könne; bedeutet doch der Druck der Lippe auf das Rohrblatt mit Sicherheit eine zusätzliche Dämpfung des Blattes. Mit zunehmender Dämpfung kann aber der Einfluß der hohen Eigenfrequenz des Blattes auf die resultierende Frequenz der akustischen Schwingung höchstens abnehmen, keinesfalls aber eine wesentliche Erhöhung dieser Frequenz bewirken.

Tatsächlich zeigen die mit der Anblasvorrichtung ausgeführten Untersuchungen auch ein völlig anderes Verhalten. Ein Überblasen in höhere Frequenzen tritt nur bei Verringerung des Blas- und Lippendruckes auf. Ehe aber über die hierüber ausgeführten Versuche näher berichtet werden soll, muß auf eine besondere Schwierigkeit bei der Durchführung und vor allem bei der Auswertung der Versuche hingewiesen werden. Die für die Klarinette benutzten

[1]) HELMHOLTZ, Die Lehre v. d. Tonempfindungen
[2]) W. ALTENBURG, Die Klarinette, ihre Entstehung und Entwicklung usw. Heilbronn 1904, S. 10.

Rohrblätter sind ein pflanzliches Produkt, das als solches niemals in mehreren Stücken genau identisch sein kann. Auch ändern sich die Eigenschaften der Blätter während der Benutzung sehr stark, ein einzelnes Blatt konnte jeweils nur für eine beschränkte Dauer zu Messungen benutzt werden. Aus diesem Grunde ist es nicht möglich, Meßwerte, die mit verschiedenen Blättern gefunden wurden, direkt miteinander zu vergleichen, oder allgemeingültige Absolutwerte für bestimmte Eigenschaften anzugeben. Es wurde deshalb in der vorliegenden Arbeit bewußt darauf verzichtet, etwa eine quantitativ strenge Übereinstimmung des Klarinettensystems mit den Gesetzen gekoppelter Schwingungskreise aufzuzeigen. Untersucht wurden jeweils nur die Änderungen bestimmter Vorgänge bei Änderung der Anblasbedingungen. Trotz dieser Einschränkung konnten dabei einige Gesetzmäßigkeiten aufgefunden werden, die das Verhalten der Klarinette besser als bisher zu erklären gestatten.

Unter Berücksichtigung dieser Eigenart der Klarinette wurde mit der schon früher erläuterten Versuchseinrichtung folgendes gefunden:

Ändert man beim Blasen der Klarinette den Luftdruck oder den Lippendruck oder beide, so springt mit abnehmendem Druck der Ton plötzlich in eine meist viel höhere Frequenz um. Dabei treten deutlich Zieherscheinungen auf, d. h.: springt der Ton während einer Druckminderung bei einem bestimmten Druck um, so kann man den Druck jetzt wieder steigen lassen, ohne daß der Ton sofort in seine alte Frequenz zurückspringt; wenn sich ein stabiler Schwingungszustand eingestellt hat, muß jeweils eine erhebliche Änderung der äußeren Umstände eintreten, um einen anderen Schwingungszustand zu erreichen.

Bei allen Versuchen zeigte die Klarinette bei Druckminderung das Bestreben, sich in den höheren Frequenzgebieten, etwa zwischen 1000 und 1700 Hz, zu erregen. Ein Überblasen in die Duodezime war nur in wenigen Fällen zu erreichen, am ehesten bei den höheren Grundtönen. Um einen Überblick über die auftretenden Frequenzen zu erhalten, wurden einige Reihen von Frequenzmessungen mit 2 verschiedenen Rohrblättern durchgeführt. Die Tonhöhe wurde durch Vergleich mit einem geeichten Schwebungstonsender ermittelt; eine gewisse Ungenauigkeit dieser Meßmethode lag in der Temperaturempfindlichkeit des Senders. Durch häufige Kontrolle eines Eichpunktes mit der zugehörigen Stimmgabel konnte dieser Fehler aber in sehr engen Grenzen gehalten werden.

Gemessen wurden die Frequenzen, die sich bei gleichbleibender Klappenstellung durch reine Änderung des Lippen- und Blasdruckes einstellten. Die Versuche wurden mit 2 verschiedenen Blättern und bei verschiedener Stellung der Lippe durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in den Kurvenblättern 1 und 2 aufgetragen. Es zeigt sich folgendes Bild: je tiefer der Grundton, desto höher liegen die überblasenen Töne. Ein Überblasen in die Duodezime ist meist erst oberhalb etwa $c' = 258$ Hz möglich. Andererseits lassen sich um so tiefere Grundtöne in die Duodezime überblasen, je näher am freien Ende die Lippe angreift. Alle überblasenen Töne liegen auf Kurven, die dem Frequenzverlauf ganzzahliger Vielfacher der Grundtöne parallel verlaufen, ohne jedoch in ihrer Frequenz genau mit ganzzahligen Vielfachen des jeweiligen Grundtones übereinzustimmen.

Zwischen Blatt 1 und Blatt 2 besteht insofern ein Unterschied, als mit Blatt 2 etwas leichter in die Duodezime zu überblasen war als mit Blatt 1. Blatt 2 war etwas dünner geschabt als Blatt 1, die mit Blatt 2 geblasenen Töne waren aber nicht immer so stabil wie die mit Blatt 1 erzeugten.

Diese Ergebnisse können folgende Erklärung finden: Ein Überblasen tritt ein, wenn Lippen- oder Luftdruck vermindert wird. Der Druck auf das Blatt durch die Lippe oder durch den statischen Druck der Luft auf die freie Fläche des Blattes bedeuten eine Dämpfung des Blattes; eine Verringerung dieser Dämpfung bewirkt demnach ein Überblasen (s. Tabelle 1 und 2).

Die Tabellen 1 und 2 enthalten neben den Überblasfrequenzen auch die zu den einzelnen Tönen gehörenden Blas- und Lippendrucke. (Bei Tönen, die sich in verschiedene Frequenzen überblasen ließen, sind die überblasenen Töne

Tabelle 1

Überblasfrequenzen

	Grundton			Überblasfrequenzen								
	Ton	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O
Lippenstellung: 9,5	e	208	55	1550	94	32						
	f	170	48	1620	126	32						
	fis	188	43	1695	126	32						
	g	146	46	1470	110	33						
	gis	146	47	1260	110	32	1540	78	29			
	a	146	43	980	110	30	1240	94	33	1690	?	?
	ais	146	47	1085	126	40	1835	94	33			
	h	146	45	1110	110	31	1815	78	30			
	c′	146	43	1160	110	34	1560	78	31			
	cis′	146	42	1205	110	33	1600	78	30			
	d′	146	43	1690	110	30	1295	110	33			
	dis′	146	41	895	146	47	1345	110	32	1740	94	30
	e′	146	44	895	78	42	1390	78	35			
	f′	146	49	945	110	35	1860	94	48	2020	?	?
	fis′	165	44	995	110	43	1495	94	27			
	g′	146	39	1035	110	42						
	gis′	165	36	1110	146	30						
Lippenstellung: 12,5	e	210	43	1560	130	44						
	f	240	48	1610	180	40						
	fis	290	51	1690	200	36						
	g	280	49	1880	200	36						
	gis	240	54	1935	180	37						
	a	280	49	1940	200	34						
	h	280	46	1085	190	39	1735	?	?			
	c′	280	42	1545	160	40	1980	200	35			
	d′	280	42	1635	190	39	2010	200	32			
	e′	280	43	880	106	38	1345	150	37	2020	240	34
	f′	280	44	1640	190	39	2045	?	?			
	fis′	280	42	1480	130	30						
	g′	280	41	1435	190	42						
	a′	240	52	1150	200	47						
Lippenstellung: 6,5	e	105	56	1565	?	?						
	f	78	54	1660	60	46						
	g	95	50	1450	35	42	1890	—	—			
	a	95	51	960	48	37						
	h	86	51	1085	54	40						
	c′	90	49	1135	60	41						
	d′	90	46	785	60	38	1240	60	41			
	dis′	95	46	830	68	44	1290	48	42			
	e′	95	46	865	60	40						
	f′	86	50	975	60	44						
	fis′	86	50	975	60	44						
	g′	78	52	1010	55	43						
	gis′	60	52	1090	60	50						
	a′	78	52	1140	60	44						
	ais′	86	50	1175	60	47						
5	e	60	53	1555	25	39						
	c′	60	52	685	38	44	1030	?	?			
	h	78	54	640	25	49						

Tabelle 2

Überblasfrequenzen

	Grundton			Überblasfrequenzen								
	Ton	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O	Frequenz Hz	Lippendruck g	Blasdruck cm H_2O
Lippenstellung: 12,5	e	85	43	1540	26	33						
	f	83	43	1555	35	30	1325	100	23			
	fis	108	32	1395	108	32	1655	108	28			
	g	90	28	1445	100	24	1190	83	19	535	83	42
	gis	108	31	1540	35	20	1255	90	28	1840	?	?
	a	90	31	1280	77	30	1650	35	22	585	58	36
	ais	unstabil										
	h	108	29	1045	58	36	1690	75	18	640	108	16
	c′	90	30	1510	70	23	745	18	40			
	cis′	115	28	1190	90	29	1560	90	25	755	100	40
	d′	140	24	1230	115	22	1585	85	22			
	dis′	unstabil										
	e′	108	34	875	74	36	1335	74	23			
	f′	110	34	1390	60	23	930	108	33			
	fis′	108	38	1480	105	22						
	g′	200	20	1040	180	24						
	gis′	205	24	1100	205	14						
	a′	205	26	1165	205	16						
Lippenstellung: 9,5	e	36	31	1535	16	23	445	10	38			
	f	75	25	1610	5	33						
	fis	60	44	1410	36	36	490	28	43			
	g	36	34	1460	10	27						
	gis	60	27	1260	60	21	1570	60	20			
	a	60	28	1280	60	21	585	16	39			
	ais	50	29	1725	48	27	1025	36	40			
	h	60	30	1755	34	32						
	c′	60	27	1525	36	26	1125	75	28			
	cis′	unstabil										
	d′	85	33	1555	5	23						
	dis′	98	32	820	75	39	1285	85	26			
	e′	98	28	865	75	28	1325	75	24			
	f′	95	30	920	95	28	1355	60	21			
	fis′	75	26	1470	75	28	965	75	34			
	g′	94	26	1020	85	30	1480	38	23			
	gis′	18	50	1185	18	30	1495	18	30			
	a′	unstabil										
	ais′	unstabil										

in der Reihenfolge der Leichtigkeit, mit der sie sich einstellen ließen, angeführt.) Es zeigt sich, daß der Druck auf das Rohrblatt um so geringer werden muß, je höher die überblasene Frequenz werden soll. Andererseits ist der zum Blasen der Grundtöne notwendige Lippendruck um so geringer, je näher am freien Ende des Blattes die Lippe angreift. Dies ist leicht verständlich, wenn man bedenkt, daß die dämpfende Wirkung der Lippe um so größer sein wird, je weiter vom Drehpunkt der Bewegung entfernt die Lippe angreift.

Diese Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: die im Klarinettenohr eingeschlossene Luftsäule, die im wesentlichen die Frequenz der geblasenen Töne bedingt, kann

außer in ihrem Grundton in ungradzahligen Vielfachen ihrer Grundfrequenz schwingen. Verringert man durch Nachlassen des Lippendruckes die Dämpfung des Rohrblattes, dessen Eigenfrequenz sehr hoch liegt, so springt bei einem bestimmten Dämpfungsverhältnis der Ton um, aber nicht etwa in die Eigenfrequenz des Rohrblattes, sondern in ungradzahlige Vielfache der Grundfrequenz der Luftsäule, wobei

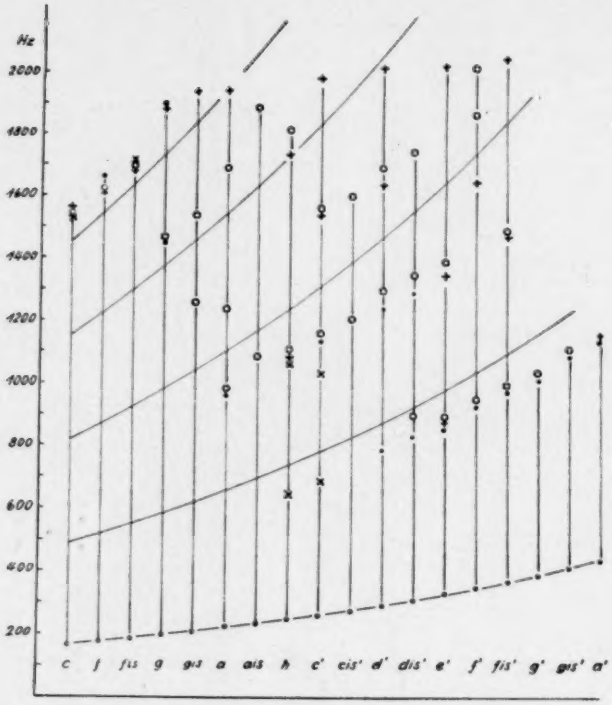


Abb. 3. Frequenzen überblasener Töne (Rohrblatt 1)

Lippenstellung: × = 5
• = 6,5
o = 9,5
+ = 12,5

die Kopplung zwischen beiden Systemen jeweils eine Verstimmung beider Eigenfrequenzen bedingt. Je geringer die Blattdämpfung wird, desto höher wird die Ordnungszahl der Luftsäulenschwingung.

Eine theoretische Erklärung dieses Vorganges ist nur dann möglich, wenn man die für punktförmige Schwinger hergeleiteten Ergebnisse auf eine Anordnung überträgt, bei der das eine der beiden gekoppelten Systeme selbst mehrere Eigenfrequenzen hat. Der Überblasvorgang läßt dann unter der Annahme einer starken Frequenz-

abhängigkeit der Dämpfung der Blattschwingung eine Deutung zu, die den Gesetzen gekoppelter Punktschwingerw eitgehend entspricht. Unter der naheliegenden Voraussetzung, daß die Dämpfung der Blattschwingung mit zunehmender Frequenz stark ansteigt, könnte nämlich der Vorgang beim Überblasen im einzelnen folgendermaßen erklärt werden: Die Dämpfung der Blattschwingung wird solange vermindert, bis

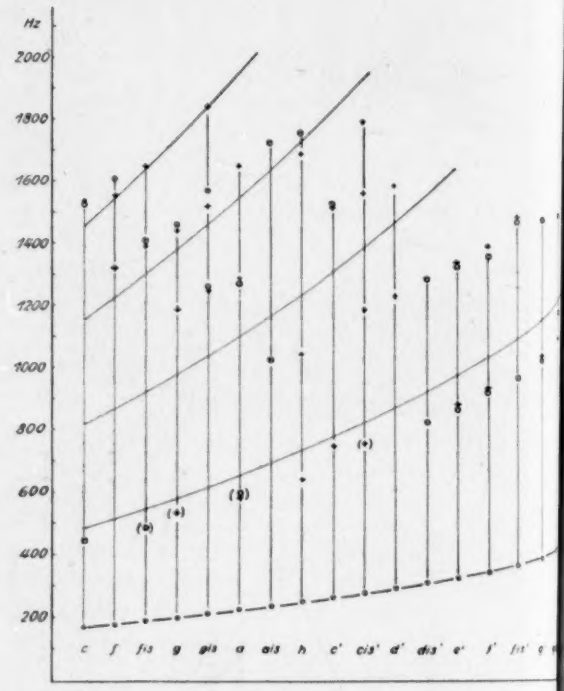


Abb. 4. Frequenzen überblasener Töne (Rohrblatt

Lippenstellung: o = 9,5
+ = 12,5

sie geringer geworden ist als die Dämpfung der Grundschwingung der Luftsäule. Ist diese Umkehr des Dämpfungsverhältnisses erreicht, so versucht die Schwingung in die Eigenfrequenz des Rohrblattes umzuschlagen; da aber die Dämpfung der Rohrblattschwingung mit der Frequenz sehr schnell ansteigt, ist schon für die nächstmögliche Luftsäulenschwingung, bei der Klarinette also für die Duodezime, auch wenn diese selbst eine etwas größere Dämpfung hat wie die Grundschwingung, das Dämpfungsverhältnis der gekoppelten Schwinger wieder

so, daß die Blattschwingung das stärker gedämpfte System ist, die Luftsäule also weiterhin die resultierende Frequenz bestimmt. Dieser Vorgang kann sich, wenn die zusätzliche Dämpfung des Blattes erneut vermindert wird, noch ein- oder zweimal wiederholen. Auch besteht die Möglichkeit, daß ein stabiler Zustand sich statt in der Duodezime erst für die fünffache oder noch höhere Frequenz des Grundtones einstellt, wenn nämlich die zusätzliche Dämpfung von vornherein um einen zu großen Betrag vermindert wurde. Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit diesem Erklärungsversuch in allen Punkten überein.

Die Tabellen 1 und 2 bestätigen im übrigen auch weitgehend die Messungen von Foord; der mittlere Blasdruck zeigt mit zunehmender Frequenz der Grundtöne die gleiche abnehmende Tendenz, wie dies in den Tabellen von Foord angegeben ist. Während Foord aber annimmt, daß dieser Abnahme des Blasdruckes eine Zunahme des Lippendruckes entsprechen müßte, lassen die Tabellen 1 und 2 eine solche Gesetzmäßigkeit nicht eindeutig erkennen. Die Höhe des einzustellenden Lippendruckes ist in weit stärkerem Maße von den jeweiligen Eigenschaften des benutzten Rohrblattes als von der Frequenz des Grundtones abhängig; auch dies weist darauf hin, daß der Lippe im wesentlichen eine dämpfende Wirkung zukommt.

Die Schwierigkeit, auch die tieferen Töne stabil in ihre Duodezime zu überblasen, ließ den Verdacht aufkommen, daß der künstliche Mund doch nicht dem natürlichen Anblasmechanismus genügend nahe kommt. Eine Abänderung der Lippe durch Benutzung natürlichen Schwammes statt Schwammgummis und Anfeuchtung der Lippe mit künstlichem Speichel (Mucin) statt mit Wasser brachten aber keine anderen Ergebnisse. Eine Rückfrage bei Klarinettenbläsern ergab dann, daß auch diese die tieferen Töne nur mit Hilfe der sog. Überblasklappe in die Duodezime überblasen.

Nach W. Altenburg[1]) ist die Überblasklappe schon bei den ältesten Klarinetten vorhanden gewesen, die von J. C. Denner, dem Erfinder der Klarinette, um 1700 gebaut wurden. Diese Überblasklappen öffnen ein kleines Loch in der Nähe des Mundstückes und erleichtern damit die Entstehung eines Schwingungsbauches im oberen Drittel des Rohres. Für das Verhalten der schwingenden Systeme interessiert selbstverständlich das Überblasen ohne Benutzung der Überblasklappe sehr viel mehr und die nächsten Versuche gelten daher auch weiterhin ausschließlich dem Anblasmechanismus des Mundstückes und dessen Einfluß auf Schwingungsform und Klangfarbe der Klarinette.

2. *Abhängigkeit der Klangfarbe von den Anblasbedingungen.*

Da schon rein subjektiv eine Änderung der Klangfarbe bei Änderung des Lippen- und Blasdruckes hörbar ist, schien es möglich, daß eine genauere Untersuchung dieser Abhängigkeit weitere Aufschlüsse über das Mundstück und seinen Einfluß auf den Schwingungsvorgang geben würde.

Für die folgenden Versuche, die der Untersuchung der Klangfarbe der Klarinette dienten, wurde ein Kondensatormikrophon mit hochgespannter Membran in Niederfrequenzschaltung benutzt. Das Mikrophon wurde mit der ersten Verstärkerröhre räumlich zusammengebaut; ein angeschlossener 3stufiger Widerstandsverstärker wurde mit einem Spezialausgangstransformator von Görler an eine Schleife der Type II (10000 Hz) des Universaloszillographen von Siemens angepaßt. Der Frequenzgang der Gesamtanordnung wurde mittels elektrostatischer Anzupfung des Mikrophons aufgenommen und so abgeglichen, daß er im Bereich der zu untersuchenden Frequenzen hinreichend konstant blieb.

Mit dieser Anordnung wurden Oszillogramme eines bestimmten Tones bei verschiedenem Blasdruck und konstantem Lippendruck sowie bei konstantem Blas- und verschiedenem Lippendruck aufgenommen. Gleichzeitig wurde jeweils die Bewegung des Blattes durch kapazitive Abtastung oszillographiert. Gegen diese Abtastung

[1]) W. Altenburg, siehe S. 80 Anm. 2.

erhoben sich allerdings Bedenken, die später noch näher angeführt werden sollen.

Die Oszillogramme wurden mit dem MADERschen Analysator bis jeweils zum 15. Teilton analysiert. Die Analysen, die in Abb. 5 u. 6 wieder-

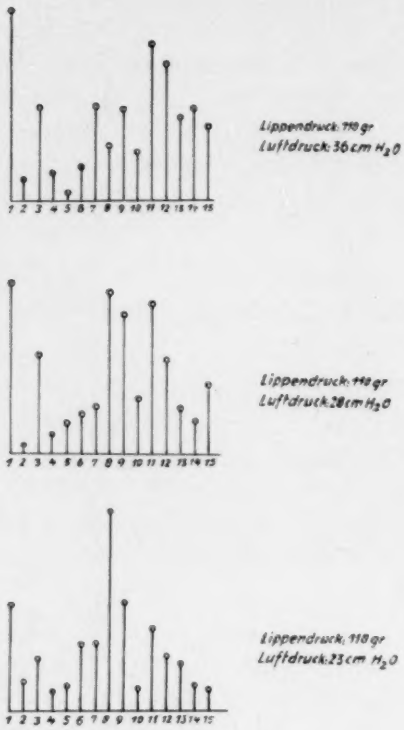


Abb. 5. Teiltonspektrum des Tones C'

gegeben sind, zeigen folgende Gesetzmäßigkeit: mit abnehmendem Blasdruck, ebenso mit abnehmen dem Lippendruck wird die Amplitude des Grundtones kleiner, die Amplitude des 8. Teiltones größer. (Da die Verstärkung der Mikrophonströme weitgehend konstant gehalten worden war, ist ein direkter Vergleich der Amplituden zulässig.) Die Änderung der höheren Teiltöne, vom 10. aufwärts, ist nicht so übersichtlich. Hier wird an sich die Analyse schon unsicher und da sie oberhalb des 15. Teiltones überhaupt nicht direkt ausgeführt werden konnte, erschien die Analyse mit dem MADERschen Gerät nicht ausreichend zur Klärung der in den Oszillogrammen aufgezeichneten Schwingungsvorgänge.

Es kommt hinzu, daß die Oszillogramme der Blattbewegung bei manchen Aufnahmen deutlich innerhalb einer Periode der Grundschwingung abklingende Schwingungen höherer Frequenz zeigen. Ein Beispiel einer solchen Aufnahme zeigt Abb. 7. Analysiert man nun einen sich periodisch wiederholenden Kurvenzug einer abklingenden und regelmäßig neu einsetzenden einfachen Schwingung mit der Periode des Wiedereinsetzens als Basis des Grundtones, so erhält man in der Nachbarschaft der Frequenz der abklingenden Schwingung noch weitere Teiltöne, deren Überlagerung eben gerade eine solch abklingende Schwingung ergeben würden. Man erhält in der harmonischen Analyse also stets nur die Auflösung eines periodischen Vorganges in seine harmonischen Teiltöne; das Vorhandensein einer diskreten, in ihrer Amplitude periodisch sich ändernden Schwingung höherer Frequenz kann zwar auf Grund solcher Analysen vermutet werden, über den zeitlichen Verlauf

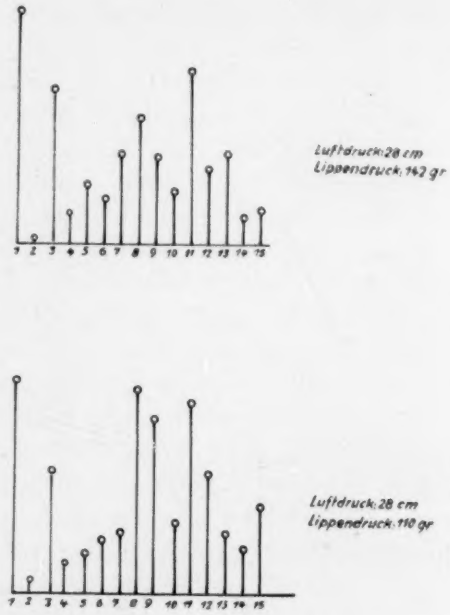


Abb. 6. Teiltonspektrum des Tones C'

ihrer Amplitude während einer Grundperiode und ihre tatsächliche Frequenz kann aber eine harmonische Analyse keinen Aufschluß geben.

Diese Eigenschaft harmonischer Analysen ist zu umgehen, wenn aus dem gesamten Frequenzgemisch vor der Aufzeichnung durch den Oszillographen das jeweils interessierende Frequenzgebiet ausgesiebt und nur dieses aufgezeichnet wird. Ist die Einschwingzeit des benutzten Siebes genügend kurz, dann wird dabei auch der zeitliche Verlauf der Amplitude der ausgesiebten Schwingung richtig wiedergegeben.

Für die vorliegenden Untersuchungen stand zu diesem Zweck ein sog. Oktavsieb von S. & H. zur Verfügung. Die Eigenschaften des Siebes wurden vor seiner Inbetriebnahme experimentell nachgeprüft. Die gefundenen Resonanzkurven der wahlweise einzuschaltenden Durchlaßbereiche zeigen eine weitgehende Übereinstimmung mit den von der Firma angegebenen Werten. Die Dämpfung nahm erst für den obersten Frequenzbereich etwas zu, für alle anderen blieb sie für den jeweiligen Durchlaßbereich konstant. Die Einschwingzeiten sind so kurz, daß die Einschwingvorgänge jeweils innerhalb einer Periode der im Durchlaßbereich aufgezeichneten Schwingung abgeklungen sind.

Die mit Hilfe dieses Siebes aufgenommenen Oszillogramme enthalten jeweils untereinander das vollständige Klanggemisch, das vor dem Sieb aufgezeichnet wurde und darunter das mit einer 2. Schleife aufgezeichnete ausgesiebte Frequenzgebiet.

Es wurden von einer großen Reihe von Tönen Aufnahmen dieser Art durchgeführt, die alle die gleiche charakteristische Zusammensetzung des Frequenzgemisches zeigen. Grundton und 3. Teilton sind deutlich ausgeprägt. Die Ergebnisse mit den nächst höheren Durchlaßbereichen des Siebes sind weniger übersichtlich, da hier verschiedene Teilschwingungen einander überlagert sind. In höheren Frequenzgebieten treten hierfür wieder eindeutige, innerhalb jeder Periode des Grundtones abklingende Schwingungen auf, deren Frequenz unabhängig von der Höhe des Grundtones stets etwa 3000 Hz und 6000 Hz beträgt.

Eine charakteristische Aufnahme dieser Art zeigt Abb. 8, bei der der Grundton, der 3. Teilton und die bei etwa 3000 Hz liegende hohe Teiltonschwingung aufgezeichnet sind.

Diese mit dem Oktavsieb gewonnenen Aufnahmen zeigen nun tatsächlich das Auftreten einer diskreten, in ihrer Amplitude sich periodisch ändernden Schwingung hoher Frequenz, die in den früheren Analysen schon durch die im gleichen Frequenzgebiet gefundenen starken Teiltonamplituden angedeutet war. Daß dort eine größere Zahl von harmonischen Teiltönen gefunden wird, liegt nicht nur an der starken Amplitudenschwankung der mit dem Oktavsieb gefundenen Schwingung, sondern auch daran, daß deren Frequenz weder ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz ist noch während einer Periode des Grundtones, entsprechend der Theorie von Das, konstant bleibt. Es lag nahe, anzunehmen, daß diese Schwingungen hoher Frequenz von den Eigenschwingungen des Blattes herrühren. Schon die auch bei den neuen Aufnahmen bestätigte Tatsache, daß eine Änderung des Lippen- und Blasdruckes einen wesentlichen Einfluß auf die Amplitude dieser Schwingung hat, weist auf das Blatt hin. Andererseits war es aber fraglich, ob die Eigenschwingung des Blattes so stark sein könne, daß

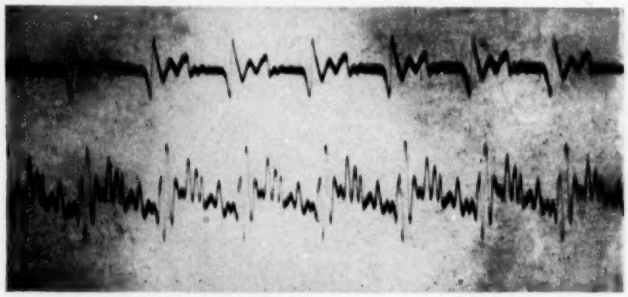


Abb. 7. C′ = 258 Hz Blattbewegung kapazitiv abgetastet

sie im Schallfeld der Klarinette noch so deutlich wahrgenommen wird.

Um über diese Frage Aufschluß zu erhalten, wurde das Blatt der Klarinette mit Hilfe einer dünnen Blechschneide etwas aus seiner Ruhelage abgebogen und durch schnelles Abziehen der Schneide über das freie Ende zum Zurückschnellen freigegeben. Oszillographische Aufnahmen dieses Vorganges zeigen nun Ausschwingvorgänge, die den innerhalb einer Grundperiode des Klarinettenklanges auftretenden Schwingungserscheinungen hoher Frequenz sehr ähnlich sind, und deren Frequenz ebenfalls bei 3000 Hz und 6000 Hz liegt.

Da noch die Möglichkeit bestand, daß diese Schwingungen von stoßerregten Teilen der Luftsäule innerhalb des Klarinettenrohres oder des Mundstückes herrührten, wurde ein Rohrblatt auf einer aus Pertinax angefertigten Gabel befestigt, deren Zinken die gleiche Schweifung wie die Bahn des Mundstückes aufwiesen. Stößt man das Blatt in dieser Anordnung an, so schwingt es unter den Befestigungs- und Auflagebedingungen des Mundstückes, aber im freien Luftraum, ohne mit der Luftsäule des Klarinettenrohres gekoppelt zu sein. Bei 2 m Abstand des parallel zum Mikrophon gestellten Blattes zeigten oszillographische Aufnahmen einer mechanisch angestoßenen Bewegung genau das gleiche Bild wie die früheren Aufnahmen. Das bedeutet, daß die Eigenschwingungen des für die Klarinette benutzten Rohrblattes durchaus in der Lage sind, erhebliche akustische Schwingungen in das Schallfeld der Klarinette zu senden. Das Klarinettenrohr hat dabei für die hohen Frequenzen dieser Schwingungen, deren Wellenlänge sich schon der Größenordnung des Rohrdurchmessers nähern, nur noch die Eigenschaften eines Richtstrahlers.

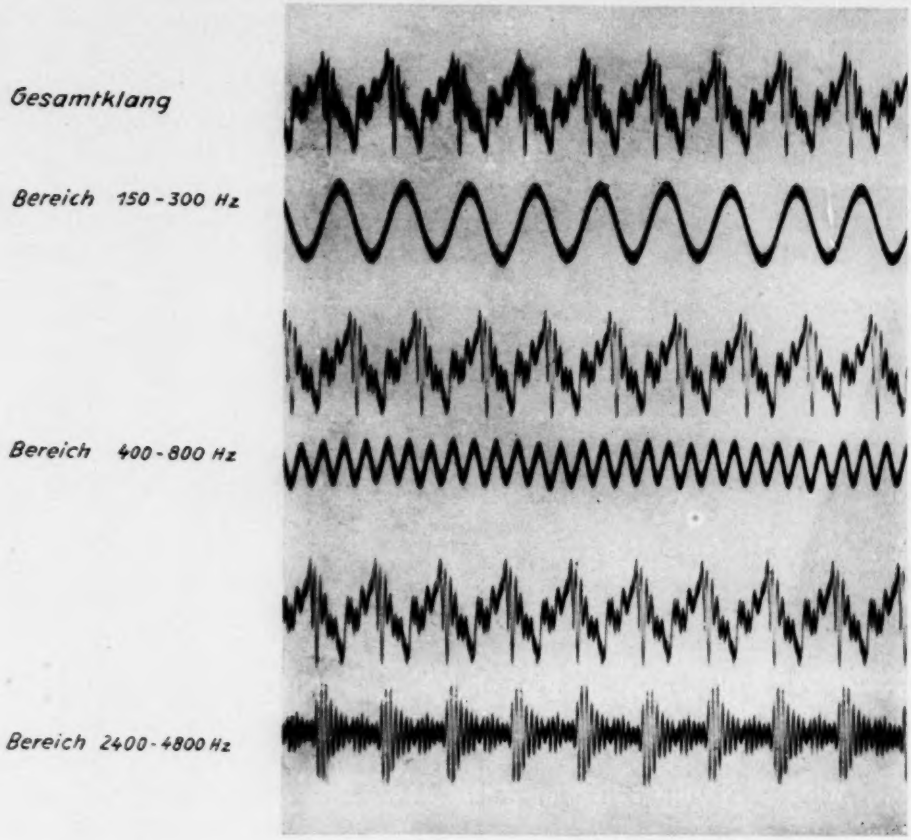


Abb. 8. Aufnahme mit Oktavsieb a = 217 Hz

Wir finden demnach im Klang der Klarinette zwei Gruppen von Schwingungen:

1. den Grundton und (im wesentlichen) seine nächsten ungradzahligen Obertöne, herrührend von der Eigenschwingung der im Rohr eingeschlossenen Luftsäule, und
2. Schwingungen sehr viel höherer Frequenz, die innerhalb jeder Periode des Grundtones starken Amplitudenschwankungen unterworfen sind und von den Eigenschwingungen des Rohrblattes herrühren.

In diesem Sinne findet also bei der Klarinette TRAUTWEINS[1]) Annahme stoßerregter Schwingungen in musikalischen Klängen eine gewisse Bestätigung, und es erklärt sich damit auch, daß das Trautonium, welches stoßerregte Resonanzkreise enthält, einen den Holzblasinstrumenten ähnlichen Klang gibt.

Nachdem es so mit Hilfe des Oktavsiebes gelungen war, im Schallfeld der Klarinette die Schwingungen der Luftsäule im Klarinettenrohr und die von den Eigenschwingungen des Blattes herrührenden Schwingungen zu trennen, konnte auf diese Weise der Einfluß des Blas- und Lippendruckes auf die Klangfarbe der Klarinette leicht untersucht werden. Es wurde ein bestimmter Ton bei verschiedenem Lippendruck und konstantem mittleren Blasdruck und umgekehrt bei konstantem mittleren Lippendruck und veränderlichem Blasdruck angeblasen und jeweils der Grundton und die hauptsächliche Eigenschwingung des Blattes aufeinander oszillographisch aufgenommen. Eine charakteristische Aufnahme (kurz vor dem Überblasen) zeigt Abb. 9.

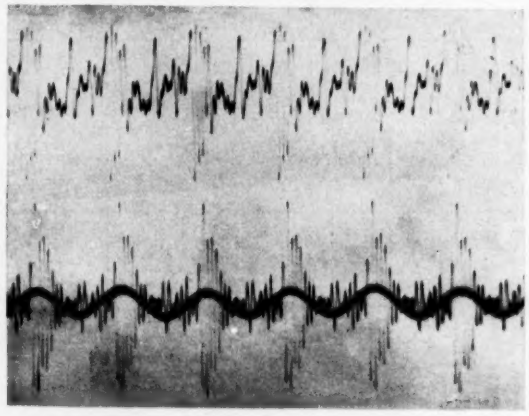


Abb. 9. Oktavsiebaufnahmen von e = 163 Hz

Bei subjektivem Abhören des Klarinettenklanges in der Achsenrichtung des Rohres, in der ja die höheren Teiltöne bevorzugt abgestrahlt werden, ist vor allem bei den tieferen Tönen die vom Blatt verursachte Schwingung hoher Frequenzen besonders deutlich wahrzunehmen. Der Klang dieser „Blattschwingung" ähnelt sehr dem eines Löschfunkensenders, dessen Schwingungsverlauf ja auch große Ähnlichkeit mit dem aufgezeichneten Oszillogramm der von der Eigenschwingung des Blattes herrührenden Frequenzgebiete des Klarinettenklanges aufweist. Es ist anzunehmen, daß gerade dieser besondere Verlauf der hohen Frequenzen im Klarinettenklang einen spezifischen Beitrag zur Charakterisierung der Klangfarbe dieses Instrumentes bietet.

Wenn es sich, wie später noch deutlicher werden wird, bei dieser Schwingung auch nicht um reine Stoßerregung handelt, so ist der Verlauf der Schwingung dem periodisch stoßerregter Schwingungen doch weitgehend ähnlich.

(Es sei erwähnt, daß diese Aufnahme von einem Blatt stammt, das besonders große Amplituden der Blattschwingung lieferte.) Da der Verstärkungsgrad für beide Frequenzgebiete gleich ist, können die Amplituden direkt miteinander verglichen werden.

[1]) F. TRAUTWEIN, Toneinsatz und elektrische Musik, Z. techn. Physik 13 (1932), S. 244.

Es zeigt sich beim Vergleich der Aufnahmen, daß sowohl mit abnehmendem Lippendruck wie mit abnehmendem Blasdruck die Maximalamplitude der Blattschwingung im Vergleich zur Amplitude des Grundtones zunimmt. Dabei ist der Einfluß einer Änderung des Lippendruckes bedeutend größer. Die Tabellen 3 und 4 geben für eine Anzahl von Tönen das Verhältnis von Grundtonamplitude zur Maximalamplitude der Blattschwingung in Abhängigkeit von den Blasbedingungen an.

Tabelle 3

Ton	Lippenstellung	Luftdruck cm H_2O	Lippendruck g	Verhältnis d. Grundtonamplitude zur Max. Amplitude d. Blattschwingung
e	10	38	168	1 : 0,75
			146	1 : 1,5
			125	1 : 2,0
			110	1 : 2,7
			94	1 : 3,3
		44	125	1 : 1,0
		40		1 : 1,25
		36		1 : 1,7
		32		1 : 1,8
		28		1 : 1,85
a	10	32	146	1 : 1,0
			125	1 : 1,35
			110	1 : 1,8
			94	1 : 2,2
		40	110	1 : 1,8
		30		1 : 1,81
		26		1 : 1,75
c′	10	28	135	1 : 0,43
			125	1 : 0,65
			110	1 : 1,1
			94	1 : 2,3
		34	110	1 : 0,65
		27		1 : 1,28
		23		1 : 1,35
d′	10	27	135	1 : 1,05
			118	1 : 1,55
			110	1 : 2,45
		30	118	1 : 1,2
		25		1 : 1,3

Bei einer Auswertung dieser Messungen muß nun allerdings wieder beachtet werden, daß die gefundenen Werte stark von dem jeweils verwendeten Blatt abhängen. Ein absoluter Vergleich der Messungen und eine quantitative Auswertung ist daher nicht möglich.

Jedoch läßt sich aus dem stets gleichen Gang der Werte folgendes ableiten:

1. Der Lippendruck des Klarinettenbläsers hat einen wesentlichen Einfluß auf die Klangfarbe der Töne.
2. Auch der Blasdruck kann eine Änderung der Klangfarbe bewirken, doch ist sein Einfluß auf die Lautstärke größer als der Einfluß auf die Klangfarbe.

Tabelle 4

Ton	Lippenstellung	Luftdruck cm H_2O	Lippendruck g	Verhältnis d. Grundtonamplitude zur Max. Amplitude d. Blattschwingung
e	11	40	126	1 : 1,1
			92	1 : 1,65
			40	1 : 2,4
	7	38	60	1 : 0,6
			30	1 : 1,1
			10	1 : 5,7
	5	33	30	1 : 0,83
			20	1 : 2,0
a	12	42	262	1 : 0,27
			200	1 : 0,45
			165	1 : 0,72
			125	1 : 0,71
	9	44	210	1 : 0,33
			170	1 : 0,36
			130	1 : 0,75
			95	1 : 1,0
c′	11	48	285	1 : 0,58
			225	1 : 0,91
			185	1 : 1,37
			125	1 : 1,73
	8	46	212	1 : 0,2
			152	1 : 0,5
			130	1 : 0,97
			112	1 : 1,28
	5	44	125	1 : 0,29
			90	1 : 0,36

3. Eine Verringerung des auf das Blatt der Klarinette ausgeübten Druckes bewirkt eine Zunahme der Amplitude der Eigenschwingung des Blattes. Erreicht das Verhältnis der Maximalamplitude der Blattschwingung zur Amplitude des Grundtones der Luftsäule im

Rohr einen bestimmten Wert, so überbläst die Klarinette in die Duodezime oder in höhere Frequenzen. Die Größe des zum Überblasen notwendigen Amplitudenverhältnisses ist wesentlich abhängig von der Eigenschaft des jeweils benutzten Blattes. Auch diese Ergebnisse zeigen also eindeutig, daß der Druck der Lippe eine dämpfende Wirkung auf die Eigenschwingung des Blattes ausübt und daß eine Abnahme dieser Dämpfung das Überblasen der Klarinette bewirkt.

Es bleibt allerdings nach wie vor merkwürdig, daß sich bisher in der Literatur der Musikinstrumente meist die Angabe findet, daß das Überblasen der Klarinette durch vermehrten Blasdruck erreicht würde. Diese Ansicht ist vielleicht von dem Überblasmechanismus der Flöte her kritiklos übernommen; es kann aber auch sein, daß der Klarinettenbläser den Eindruck vermehrten Druckes dadurch gewinnt, daß die überblasenen Töne mehr Luft brauchen als ihre Grundtöne. Eine Messung mit einer Gasuhr zeigte, daß gleich nach dem Überblasen der Luftverbrauch um durchschnittlich 20—30% steigt, für tiefe Töne etwas mehr als für hohe. (Es mag hierbei erwähnt sein, daß die Klarinette etwa 0,2 l Luft pro Sek. bei forte-Blasen benötigt.)

Der Verfasser, der kein ausgebildeter Klarinettenbläser ist, fand bei eigenen Versuchen stets die Ergebnisse, die mit dem künstlichen Mund gewonnen waren, bestätigt: eni Nachlassen des Lippendruckes ließ den Ton in die früher aufgezeigten hohen Frequenzen umspringen.

3. Stroboskopische Beobachtung der Blattbewegung.

Das starke Auftreten der in ihrer Amplitude sich periodisch ändernden Eigenschwingung des Blattes im Klang der Klarinette ließ nun den Wunsch auftauchen, die Bewegung des Blattes selbst der genaueren Beobachtung zugänglich zu machen.

Die kapazitive Abtastung hatte kein deutliches Bild der Blattbewegung ergeben. Dies erklärt sich leicht daraus, daß die Amplitude der Blattbewegung die Größenordnnug der Beläge des Abtastkondensators selbst erreicht. Wenn dadurch auch die Kapazitätsänderung sehr groß wird, so wird andererseits aber die absolute Kapazität des Abtastkondensators bei größerer Entfernung der Beläge voneinander so klein gegenüber den Kapazitäten der Zuleitung vom Schwingungskreis her und den zusätzlichen Kapazitäten des Schwingungskreises selbst, daß dadurch die Empfindlichkeit der Anordnung außerordentlich gering wird; aufgezeichnet wird nur der Teil der Bewegung, bei dem die Beläge sich weit genug genähert haben. Auch kann bei solch großen Abstandsänderungen keine lineare Kapazitätsänderung mehr erwartet werden. Zu diesen prinzipiellen Schwierigkeiten der Anordnung kamen zwei weitere Punkte hinzu, die gegen eine Beibehaltung und evtl. Verbesserung der kapazitiven Abtastung der Blattbewegung sprachen.

Die als Kondensatorbelag benützte Aluminiumfolie mußte mit Kohesan auf dem Ende des Blattes befestigt werden, um längere Zeit zu halten. Selbst unter der Annahme, daß die Belastung des Blattendes durch die Aluminiumfolie keinen wesentlichen Einfluß hat, bewirkt das Eindringen des Kohesans zweifellos eine Änderung der elastischen Eigenschaften des Rohrblattes. Bei der großen Empfindlichkeit des Schwingungssystemes der Klarinette auf die jeweiligen Eigenschaften des Blattes sind solche Änderungen in der Struktur gerade des dünnen Endes des Blattes sicherlich ungünstig. Noch schwerwiegender aber ist ein anderer Nachteil des Kondensatorbelages an der Blattspitze: er zeigt nur die Bewegung der Spitze selbst an; über die Bewegung des übrigen Teiles des Blattes hätte nur eine schrittweise Verschiebung des Belages über die ganze Länge des schwingenden Blattes etwas aussagen können.

Unter Verzicht auf die Wiedergabemöglichkeit etwa durch Oszillogramme od. dgl. wurde daher ein völlig anderer Weg beschritten. Die Anordnung des künstlichen Mundes mit durchsichtigen Seitenwänden gestattet ja die Beobachtung des Blattes in seiner ganzen Länge. Beleuchtet man das Blatt von der Rückseite her mit einer Glimmlampe, die mit Wechselstrom gespeist wird, so kann man die Blattbewegung in der ganzen Länge des Blattes stroboskopisch sichtbar machen. Für die praktische Ausführung dieser Anordnung wurde der schon früher er-

wähnte Schwebungstonsender benutzt, dessen Ausgangsspannung über einen Leistungsverstärker und einen Transformator erhöht wurde. Eine Gleichvorspannung sorgte dafür, daß keine Frequenzverdopplung vorkam.

Bei der Beobachtung der Blattbewegung mit der oben geschilderten stroboskopischen Anordnung zeigt sich nun eine Aufteilung der

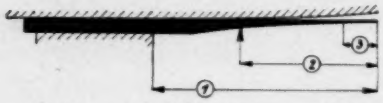


Abb. 10. Rohrblatt im Schnitt

Blattbewegung in 3 deutlich voneinander getrennte Gebiete, die in der Abbildung 10 eingezeichnet sind.

1. Mit der Frequenz des Grundtones öffnet und schließt das Blatt in seiner ganzen Länge vom Befestigungspunkt bis zum freien Ende: (1). Beim Schließen legt sich nicht das ganze Blatt an die Bahn des Mundstückes an, sondern nur ein kleiner Teil seiner Spitze; im übrigen Teil bleibt ein feiner Spalt offen.
2. Zu dieser Bewegung des gesamten Blattes kommt eine zweite Schwingung höherer Frequenz, die etwa den Berührungspunkt der Lippe als Drehpunkt hat: (2). Da die Frequenz dieser Schwingung weder konstant noch ein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingung ist, konnte die Bewegung dieses Teiles des Blattes nicht ebenso zur Beobachtung zum Stehen gebracht werden wie die Grundschwingung des Blattes; jedoch ist deutlich zu erkennen, daß diese Schwingung während jeder Periode der Grundschwingung zweimal zum Stillstand kommt: bei geschlossenem Mundstück, d. h. also, wenn die Spitze des Blattes auf der Bahn des Mundstückes aufliegt, und bei völlig geöffnetem Mundstück, d. h. in dem Augenblick, in dem das Blatt seine Normallage einnimmt.
3. Gleichzeitig mit dem Auftreten dieser Schwingung (2) sieht man die Spitze des Blattes in dem Bereich, in dem dies besonders dünn geschabt ist, eine weitere Schwingung noch höherer Frequenz ausführen (3), die ebenso wie die Schwingung (2) zweimal in jeder Grundperiode zur Ruhe kommt.

Auch diese Bewegung kann ebensowenig wie die Bewegung (2) zur Beobachtung zum Stehen gebracht werden. Doch war von früheren Versuchen her bekannt, daß das Rohrblatt bei extrem schwachem Luftdruck zu konstanter Eigenschwingung gebracht werden konnte. (Daß es sich um die Eigenfrequenz des Blattes handelt, ist daraus zu erkennen, daß eine Änderung der Klappenstellung des Rohres keine hörbare Frequenzänderung bedingt.) Erregt man das Blatt in dieser Weise, so ist eine stroboskopische Beobachtung der Eigenschwingung des Rohrblattes möglich, wenn auch die Amplituden ziemlich klein sind, so daß die Beobachtung dadurch wieder erschwert wird. Mit Hilfe einer Lupe ist aber zu erkennen, daß die Spitze des Blattes während des größten Teiles einer Periode konphas mit dem nächsten Teil des Blattes schwingt, während es bei dichter Annäherung an die Bahn des Mundstückes stark hinter der Bewegung des übrigen Blattes zurückbleibt. Relativ zu ihrem Drehpunkt schwingt also die Blattspitze mit der doppelten Frequenz des übrigen Blattes.

Nimmt man die konstant erregte Eigenschwingung des Blattes oszillographisch auf (Abb. 11), so ist hier das Auftreten der doppelten Frequenz ebenfalls deutlich zu erkennen: die Schallfeldschwingungen geben also ein weitgehend getreues Bild der Eigenbewegung des Blattes wieder. Der Vergleich mit einem auf dem gleichen Oszillogramm aufgenommenen Stimmgabelmeßsummer gibt eine Eigenfrequenz des Blattes von 3250 Hz. Andere Blätter hatten eine Eigenfrequenz von 3320 Hz und 3230 Hz.

Die Bewegung des Rohrblattes einer Klarinette teilt sich also auf:

1. in die Steuerbewegung der Grundschwingung des Klarinettenrohres, frequenzbedingt durch die Eigenfrequenz des Rohres in seiner jeweiligen Klappenstellung und
2. in die Eigenschwingung des Blattes, die in ihrer Amplitude (und in geringem Maße auch ihrer Frequenz) abhängig vom Druck und vom Angriffspunkt der Lippe ist.

An der Steuerbewegung ist das Blatt in seiner gesamten beweglichen Länge beteiligt; die Ei-

genschwingung führt im wesentlichen nur der sich verjüngende vordere Teil des Blattes aus.

Das scheinbare Abklingen der Eigenschwingung während einer Periode des Grundtones ist nicht allein durch die Dämpfung des Blattes bedingt, sondern im wesentlichen dadurch, daß das freie Ende des Blattes um so weniger Raum zu Eigenschwingungen hat, je dichter es während seiner Grundschwingung an die Bahn des Mundstückes herankommt.

Anordnung wird nachgewiesen, daß der Lippe des Bläsers beim Anblasen einer Klarinette im wesentlichen die Aufgabe einer zusätzlichen Dämpfung des Rohrblattes zukommt. Eine Abnahme dieser zusätzlichen Dämpfung durch Verringerung des Lippendruckes bewirkt ein Umschlagen des geblasenen Tones in die Duodezime oder in höhere Frequenzen. Die Bewegung des Rohrblattes wurde der stroboskopischen Beobachtung zugänglich gemacht und gefunden, daß das Blatt in seiner gesamten beweglichen Länge

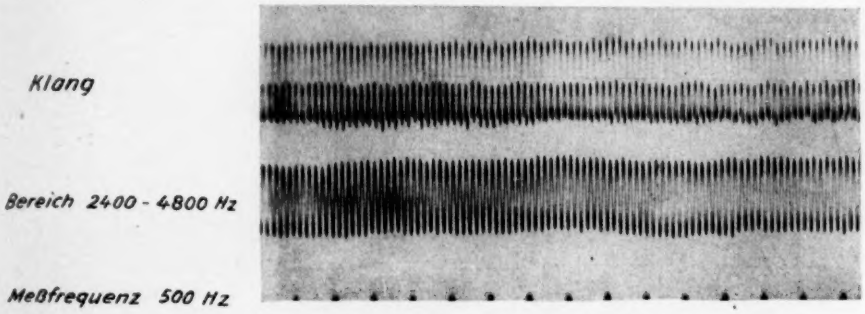


Abb. 11. Konstante Eigenschwingung des Blattes, akustisch aufgenommen

4. Schlußbemerkung.

Zum Schluß sei noch auf eine Erscheinung hingewiesen, die zwar noch nicht näher untersucht wurde, deren Auftreten aber einen weiteren Beweis für das Vorhandensein gekoppelter Schwinger bildet. Erhöht man den Lippendruck über die obere Grenze stabiler Tonerzeugung, so treten konstante Schwebungen auf, deren Frequenz vom Druck der Lippe abhängt. Diese Schwebungen, die von WIEN für gekoppelte Schwinger unter bestimmten Voraussetzungen auf Grund theoretischer Betrachtungen gefordert werden, konnten bei den Zungenpfeifen bis jetzt experimentell nicht beobachtet werden. Bei der Klarinette treten sie in so konstanter Form auf, daß hier ein weiteres Feld experimenteller Untersuchungen zu finden sein dürfte.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über die Entwicklung einer Apparatur berichtet, die das künstliche Anblasen einer Klarinette unter meßbaren Bedingungen ermöglicht. Mit Hilfe dieser an der Steuerung der Grundschwingung der geblasenen Töne beteiligt ist, während der vordere schlank verlaufende Teil des Blattes in seiner Eigenfrequenz erregt wird. Die Amplitude dieser Eigenschwingung ist während einer Periode des Grundtones starken Schwankungen unterworfen. Dies scheint zu einem wesentlichen Teil dem Ton der Klarinette die für dies Instrument charakteristische Klangfarbe zu geben.

Die Anregung zu dieser Arbeit, die am Lehrstuhl für theoretische Elektrotechnik und Schwachstromtechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe durchgeführt wurde, erhielt der Verfasser von seinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. phil. H. BACKHAUS, dem der Verfasser für sein stets förderndes Interesse an der Durchführung der Arbeit zu größtem Dank verpflichtet ist. Auch sei an dieser Stelle der Helmholtz-Gesellschaft für die Überlassung eines Oszillographen, der Karlsruher Hochschulvereinigung für die Beschaffung eines Oktavsiebes gedankt.

(Eingegangen am 16. Juni 1936.)

Die Ausbildung nachhallarmer Räume

Mitteilung der Werner Genest GmbH., Berlin-Tempelhof, Ingenieurbüro und Fabrik für Isolierungen.

Meßtechnische Untersuchungen der verschiedensten Art setzen das Vorhandensein eines nachhallarmen Raumes häufig voraus. In Anlehnung an eine erstmalig im Laboratorium des Instituts für Schwingungsforschung, der Techn. Hochschule Berlin, ausgeführte Anordnung hatte die Werner Genest GmbH., Berlin-Tempelhof, die Möglichkeit, für verschiedene Behörden und Industriefirmen die Ausführung nachhallarmer Meßzimmer zu übernehmen. Dabei konnten einige Abänderungen für die Praxis durchgeführt werden, die bezweckten, die Nachhalldämmung noch weiter zu treiben und sie auf alle Frequenzen auszudehnen. Die Tatsache, daß bei porigen Stoffen die Schallschluckzahl im Bereich unter 400 bis 500 Hz ganz erheblich absinkt, führte zu der Lösung, hinter dem porigen Belag der Raumbegrenzungsflächen eine zweite Schicht zu schalten, die wiederum die tiefen Frequenzen stark schluckt und erst bei höheren Frequenzen an Wirkung verliert. Dadurch wurde, wie Bild 1 darstellt, ein über das ganze Frequenzband wirksames Schallschluckvermögen erzielt. Die kulissenartige Aufhängung porigen Schallschluckstoffes (gegen Entflammung imprägnierte Watte) ist so angeordnet, daß ausreichende Abstände ein

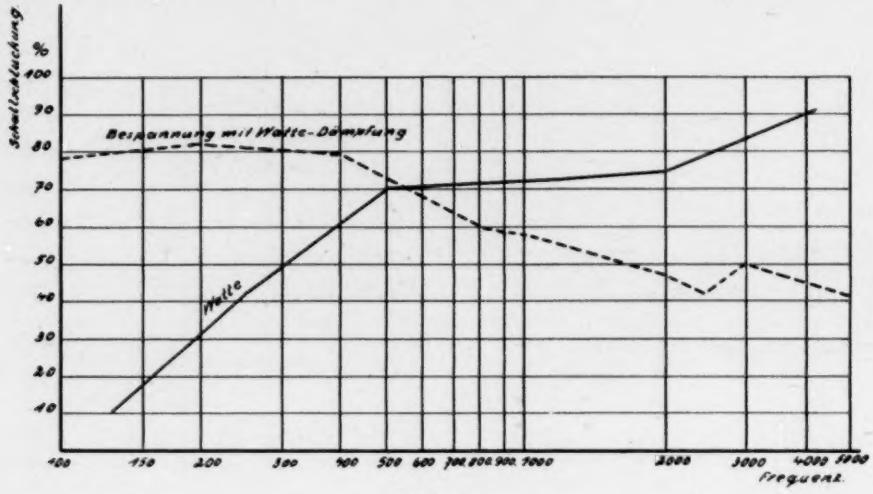


Abb. 1

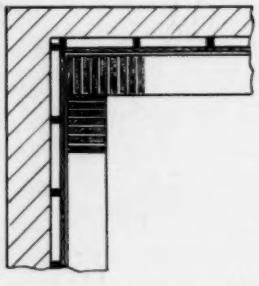


Abb. 2

Auftreffen der tiefen Frequenzen auf die dahinterliegende Bespannung für die Schallschluckung ermöglichen. Die in entsprechenden Abständen angeordneten Kulissen bieten dabei den hohen Frequenzen eine vermehrte Schallschluckfläche. Die Anordnung ergibt sich aus Bild 2.

Über in entsprechenden Abständen angeordnete Leisten ist ein imprägnierter Stoff gespannt, dessen rückwärtige, vom Raume abgekehrte Seite zur Dämpfung der Eigenschwingungen mit Watte benäht ist. In einem Abstand, der die Schwingfähigkeit dieser Bespannung nicht hindert, sind dann die Kulissen aus imprägnierter Watte zweckentsprechend angeordnet.

In Abb. 3 und 4 sind Teile eines fertigen Raumes dargestellt, wie er für ein großes Industrieunternehmen ausgebildet wurde. Das Begehen eines solchen Raumes wird dadurch ermöglicht, daß Roste, die ebenfalls mit Schallschluckmaterial bekleidet sind, auf entsprechenden Unterstützungen aufliegen. Die Aufstellung der Meßgeräte, der Tongeber usw. kann in verschiedener Weise durchgeführt werden. Die Abbildung zeigt die Lösung, daß die Geräte an gespannten Drähten hängen.

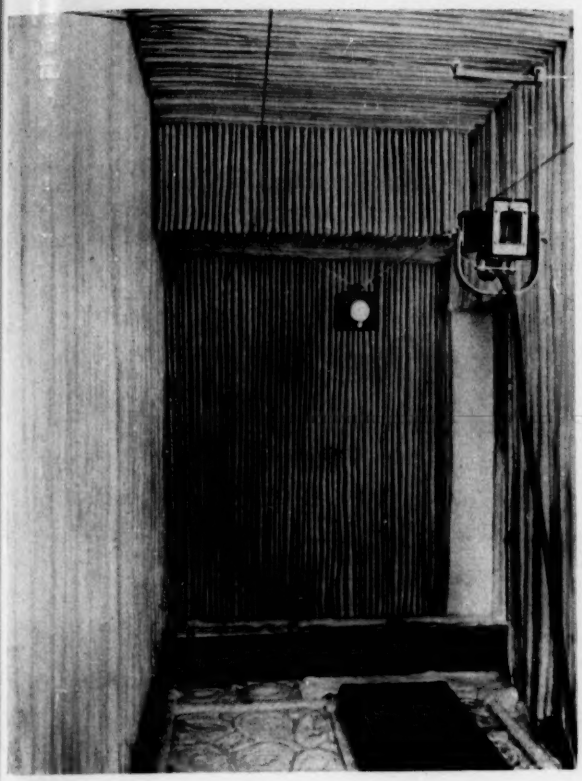


Abb. 3. Schallgedämpfter Raum

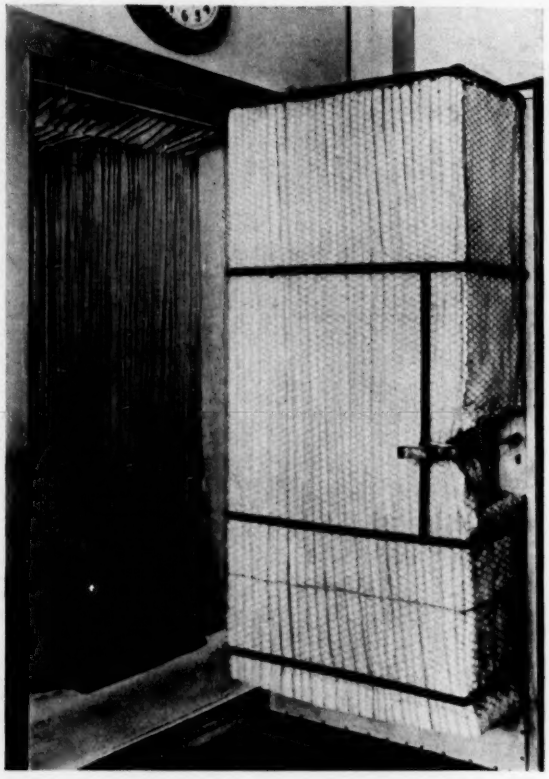


Abb. 4. Türe zum schallgedämpften Raum

PATENTSCHAU

Bearbeitet von Heinrich Kösters

8.

Deutsches Patent Nr. 633451, patentiert ab 27. 10. 34, ausgegeben am 27. 7. 36

Dr.-Ing. Alfred Reinsch und Dr. Ulrich Schmidt in Berlin-Charlottenburg

Verfahren und Einrichtungen zur Bestimmung Überschreitung einer bestimmten Lautstärke bei Kraftfahrzeuggeräuschen

Lautstärkemeßgeräte sind im allgemeinen so gebaut, daß die Anzeige der gemessenen Lautstärken mit einem Zeigerinstrument erfolgt. Die bei der Ablesung des gewöhnlich stark pendelnden Zeigers leicht auftretenden Ablesefehler sollen dadurch vermieden werden, daß nur bestimmte Grenzwerte der Lautstärke mit Hilfe einer Glimmlampe oder eines Relais angezeigt werden. Sinkt die Lautstärke des gemessenen Geräusches wieder unter die eingestellte Grenze, so soll die Anzeige bestehen bleiben, bis sie von Hand wieder rückgängig gemacht wird. Das Verfahren soll besonders zur Messung von Verkehrslärm, bei dem es sich um Feststellung der durch Gesetz festgelegten Grenzwerte von 85 und 100 Phon handelt, geeignet sein.

9.

USA. Patent Nr. 2049616, patentiert ab 18. 5. 33 ausgegeben Juli 1936

Edgar D. Lilja, Rockford III

Electrical musical Instrument

Das Patent betrifft ein großes orgelähnliches Musikinstrument, dessen Töne auf folgende Weise erzeugt werden sollen. Eine große Anzahl von runden Lochscheiben aus magnetischem Material werden von einem gemeinsamen Motor mit gleichbleibender Geschwindigkeit gedreht. Jeder Lochkreis wird bei seiner Drehung an einem permanenten Magneten vorbeigeführt. Die Änderung des Magnetflusses erzeugt einen Wechselstrom in der über dem Magneten befindlichen Spule. Für jeden Ton sind eine Anzahl von Lochkreisen vorhanden, die sich durch die Form der Löcher unterscheiden. Hierdurch hat man es in der Hand, den Obertongehalt zu verändern.

10.

Deutsches Patent Nr. 633452, patentiert ab 6. 10. 34, ausgegeben 27. 7. 36

Klangfilm G.m.b.H., Berlin. Erwin Gerlach.

Elektrodynamisches Gerät zur Herstellung von Tonaufzeichnungen mit verlagerter Nullinie

Stärke des Grundgeräusches bei der Wiedergabe einer Lichtton-Zackenschrift wächst bekanntlich mit der Breite des unbelichteten Filmstreifens und ist deshalb bei kleiner Aussteuerung besonders groß. Es sind Verfahren bekannt durch eine besondere Blende den unbelichteten Teil des Tonstreifens einzuengen und der jeweiligen Aussteuerung anzupassen. Die Steuerung geschieht hierbei durch einen abgezweigten

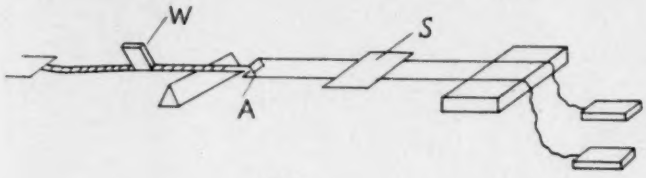


Abb. 1

Teil des Mikrophonstromes oder durch den Strom eines Hilfsmikrophons. Erfindungsgemäß kann derselbe Erfolg auch durch Verlagerung der Nullinie einer Tonspur erreicht werden.

Die grundsätzliche Anordnung ist in Abb. 1 dargestellt. Der obere Aufhängepunkt der zur Erzeugung der Tonspur benutzten Oszillographenschleife (A) wird durch ein besonderes Weicheisensystem (W), in dem ein gleichgerichteter Teil des Mikrophonstromes fließt, gedreht. Die Verdrehung des Aufhängepunktes und damit auch des Spiegels (S) bewirkt eine Verschiebung der Nullinie. Die Verschiebung wird so gewählt, daß der unbelichtete Teil des Tonstreifens möglichst schmal wird.

11.

Deutsches Patent Nr. 635259, patentiert ab 28. 5. 32, ausgegeben am 14. 9. 36.

Radio Corporation of America in New York

Einrichtung zum Messen der Schallintensität

Das Patent ist ein Zusatz zum Patent 600518 vom 25. 6. 1934. Das Hauptpatent beschreibt eine Einrichtung zur unmittelbaren Messung der Schallintensität in einem einzigen Meßvorgang. Während es für den Fall der ebenen, fortschreitenden Welle zur Feststellung der Energie bekanntlich genügt, entweder die Druck- oder die Geschwindigkeitskomponente zu bestimmen, ist es für den häufigeren Fall des unbestimmten Schallfeldes notwendig, beide Größen zu bestimmen. Durch die Verwendung zweier Mikrophone, von denen eines auf den Druck und das andere auf die Schnelle anspricht, läßt sich die Schallintensität in jedem Falle eindeutig bestimmen.

Nach dem Patentanspruch sollen diese beiden Messungen miteinander verknüpft werden, in dem die verstärkte Wechselspannung beider Mikrophone einem gemeinsamen Wattmeter über getrennte Verstärker zugeführt wird. Und zwar wird die Spannung des Druckempfängers (Kondensatormikrophon) der Spannungsspule und die des Geschwindigkeitsempfängers (Bändchenmikrophon) der Stromspule zugeführt. Die Anzeige des Wattmeters ist dann ein Maß für die Schallintensität. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß die durch die verschiedenen Mikrophone hervorgerufene Phasenverschiebung wieder ausgeglichen wird (Abb. 2).

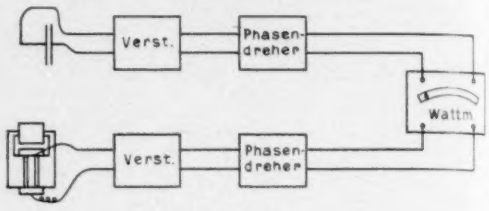


Abb. 2.

Zusatzpatent

Ein Nachteil des Hauptpatentes liegt in der Notwendigkeit, die Richtung der Geschwindigkeitsenergie zu kennen. Nach dem Zusatzpatent sollen drei Geschwindigkeitsmikrophone in den drei Ebenen eines rechtwinkeligen Koordinatensystems und ein ungerichteter Druckempfänger benutzt werden

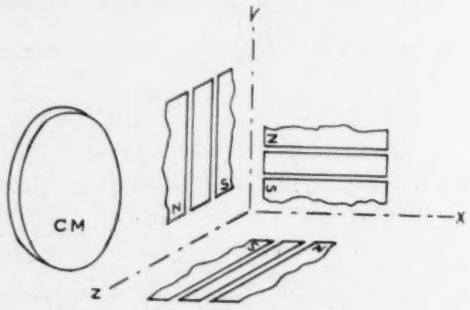


Abb. 3

(Abb. 3). Die verstärkte Spannung der einzelnen Mikrophone wird getrennten Thermokreuzen zugeführt und die Summe der Thermospannungen in einem gemeinsamen Spannungsmesser gemessen.

12.

Deutsches Patent Nr. 633631, patentiert ab 17. 2. 36, ausgegeben am 31. 8. 36

Siemens & Halske A.-G. in Berlin-Siemensstadt, Dr. Helmut Sell

Einrichtung zur akustischen Untersuchung von Körpern

Das Auftreten einer akustischen Rückkopplung zwischen einem Mikrophon und einem Schallsender,

die an ein und demselben Verstärker liegen, ist durch den Verstärkungsgrad und durch das Schalleitvermögen des zwischen beiden befindlichen Mediums bedingt. Diese Tatsache soll zur Untersuchung von Gewebeveränderungen im menschlichen Körper (Auskultation) und zu Materialprüfungen auf folgende Weise benutzt werden.

Ein Körperschallsender und -empfänger werden in einen bestimmten Abstand auf den zu untersuchenden Körper gebracht und die Verstärkung bis zum Einsatz der Rückkopplung erhöht. Derselbe Versuch wird mit einem gesunden Körper wiederholt. Der Unterschied des Verstärkungsgrades beim Einsatzpunkt der Rückkopplung ist ein Maß für die Verschiedenheit der untersuchten Körper.

Nach der Patentschrift ist es oft vorteilhaft, hierfür abgestimmte Sender oder Empfänger zu verwenden, da man besonders aus dem Verhalten des zu prüfenden Körpers gegenüber verschiedenen Frequenzen bestimmte Schlüsse ziehen kann.

SCHRIFTTUM

Watson, F. R. Keron und C. Morrisol, **Sound Absorbing Value of Portland Cement Concrete.** J. Amer. Concrete Inst. 7, 659, 671 (1936).

Obschon als hochgradige Schallschlucker der porösen Art eine große Zahl besonderer Stoffe entwickelt worden ist, interessiert den Baufachmann noch mehr das Schallschluckvermögen derjenigen Baustoffe, die er direkt zu benutzen pflegt und die oft, wie etwa verschiedene Betonsorten eine genügende Porosität aufweisen; nur darf die Fähigkeit des Schalles, in die Poren der Wand einzudringen, nicht durch Anstrich der Oberfläche gehindert sein. Diesen Fragen widmet sich die vorliegende Arbeit sehr ausführlich. — Es werden mittlere Schluckgrade von über 70 verschiedenen Betonsorten und ihre Veränderung durch verschiedene Oberflächenbehandlungen mitgeteilt. Ein ausführlicher tabellarischer Anhang gibt über die Zusammensetzung der einzelnen Arten genaue Auskunft. Es zeigt sich, daß insbesondere zwei Sorten, die als Haydite- und Cinder-Aggregate Concrete (Schlackenbeton) bezeichnet werden, besonders schluckfähig (50%) sind, während z. B. Limestone-Aggregate Concrete (Kalkbeton) nur 20% absorbiert. Hinsichtlich der Oberflächenbehandlung zeigt sich deutlich, daß das Schluckvermögen am wenigsten durch Bespritzung mit Wasserfarbe herabgesetzt wird (z. B. von 60% auf 43%), während Pinselanstrich mit Ölfarbe die schallabsorbierende Wirkung viel stärker verringerte (von 60% auf 18%). — Zur Messung wurde einmal das bekannte Hallraumverfahren verwendet für die Frequenzen 250, 500, 1000, 2000 und 4000 Hz. Die meisten Ergebnisse wurden aber mit Hilfe einer Rohranordnung gewonnen, die freilich kaum richtige Absolutwerte liefern, aber doch ein gutes qualitatives Bild über die verschiedenen Arten und Oberflächenbehandlung ergeben dürfte. Hierbei schließt ein Konuslautsprecher das eine Ende eines Rohres ab, dessen anderes Ende von einer zur Rohrachse unter 45° geneigten Materialprobe begrenzt wird, welche den Schall in ein dort senkrecht anstoßendes zweites Rohr reflektieren soll. In dem zweiten Rohr befindet sich das Mikrophon. Dasselbe ist durch einen Exponentialtrichter möglichst reflexionsfrei abgeschlossen. — Da die Wellenlänge der verwendeten Frequenz (500 Hz) von der Größenordnung der Apparaturabmessungen ist und selbst durch den anschließenden Exponentialtrichter ein reflexionsfreier Abschluß nicht erzielbar sein dürfte, sind Störungen bei dieser Anordnung unvermeidlich. — Es sei noch erwähnt, daß Betrachtungen über die Wärmeentwicklung bei der Schallvernichtung in porösen Stoffen wiedergegeben werden, insbesondere wird angegeben, daß sich ein Teppich von 0,6 cm Stärke, der 30 Minuten einem starken Sender ausgesetzt wird, seine Temperatur nur um 0,03° Celsius erhöht.

L. Cremer

M. Rettinger. **The theory of Sound Absorption of Porons Materials, Flexible and Nonflexible.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 53.

Die vorliegende Arbeit stellt die erste ausführlichere Behandlung der Theorie der Schallschluckung in porösen Wänden in englischer Sprache dar. Es werden zuerst die bekannten kennzeichnenden Materialkonstanten eingeführt, die Porosität, als Verhältnis des im Material enthaltenen Luftvolumens zum Gesamtvolumen, der Stömungswiderstand, als Verhältnis des Druckgefälles zu der hierdurch erreichten Geschwindigkeit eines Gleichluftstromes und ferner die Materialdicke. Schließlich wird noch eine besondere Dichte des schwingenden Materials angenommen, die von der Dichte der Luft abweichen kann, indem auch das eigentliche Wandmaterial zu Schwingungen angeregt wird. Diese letzte Konstante kann, wie schon von anderer Seite gezeigt, von der Frequenz, nach Meinung des Verfassers aber auch von der Amplitude und vielleicht auch der Dicke des Materials abhängen. (Für die letzten Vermutungen werden keine theoretischen Begründungen angegeben, auch keine experimentellen

Erfahrungen mitgeteilt.) Die Frequenzabhängigkeit der mitschwingenden Masse entsteht wie zuerst WINTERGERST für freihängende Stoffe feststellte, dadurch, daß die mitschwingende Bewegung des Wandmaterials und die Luftströmung in den Poren parallel geschaltete Schwingungswiderstände von verschiedener Frequenzabhängigkeit für die Luft ergeben. Der Verfasser zeigt, daß die Wirkung des Mitschwingens bei Stoffen mit sehr kleinem Strömungswiderstand (z. B. Gesteinswolle mit einer Dichte von 0,04 g/cm³ und einem Strömungswiderstand von 10 C.G.S.) bei tieferen Frequenzen zu einer höheren Absorption führen muß. Er vermutet daher, daß die Unstimmigkeit zwischen der angenäherten Theorie, die kein Mitschwingen berücksichtigt, und den Meßergebnissen, die auch bei senkrechtem Einfall höhere Werte lieferten, auf die Vernachlässigung des Mitschwingens zurückzuführen ist. L. CREMER

FREDERICK V. HUNT, **Apparatus and Technique for Reverberation Measurements.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 34.

Es wird eine neue Nachhallmeßapparatur beschrieben, bei welcher die Nachhallzeit durch eine Uhr gemessen wird, die beim Abschalten des Lautsprechers elektrisch eingeschaltet und ebenso elektrisch bei Sinken des Schalldruckes am Mikrophon unter einen vorher eingestellten Schwellenwert wieder abgeschaltet wird. Hierzu kommt nun hinzu, daß mit Abschalten der Uhr der Lautsprecher wieder eingeschaltet und dieser ebenso automatisch bei Erreichung eines gewissen oberen Wertes des Schalldruckes wieder abgeschaltet und die Uhr eingeschaltet wird. Es entsteht so ein fortgesetztes Anwachsen und Abnehmen des Schalles, wie bei den bereits von HOLLMANN und SCHULTES (Elektr. Nachr.-Techn. 8 [1931], H. 11) zur Nachhallmessung verwendeten raumakustischen Kippschwingungen oder der Anordnung von HOLTZMARK und TANDBERG (Elektr. Nachr.-Techn. 10 (1933), S. 389. Die Uhr zählt nur die Nachhallzeiten, die in ihrer häufigen Folge gleich einen Mittelwert liefern. — Es werden genauer einzelne technische Feinheiten der Apparatur mitgeteilt, z. B. ein Heultonkondensator, der die Heultonbreite unter Beibehaltung der gleichen mittleren Frequenz zu ändern gestattet, ferner eine Abschaltung der Anodenspannung unter Mitwirkung eines Widerstandskapazitätskreises, der ein Knallen im Lautsprecher verhindert, eine speziell entwickelte elektrische Uhr und schließlich ein Tiefpaßfilter mit einer Grenzfrequenz von 5 Hz am Gleichrichter, um die Nachhallkurven zu glätten. Es wird gezeigt, daß durch Änderung dieser Grenzfrequenz nur eine Parallelverschiebung der Nachhallgraden, aber keine Änderung der Neigung entsteht, aus welcher die Nachhallzeit bestimmt wird. Besonders beachtenswert sind die genauen Angaben über die mittleren Fehler der Zeitbestimmung in Abhängigkeit der Zahl der Meßwerte, wofür zahlreiche Kurven angegeben werden. Will man die Punkte auf $^1/_{100}$ Sek. genau bestimmen, so sind für jeden Meßpunkt doch 40 Zeitmessungen erforderlich, wobei je 10 automatisch hintereinander erfolgen können, dagegen viermal zweckmäßig das Mikrophon versetzt wird.

L. CREMER

CHESTER W. RICE. **Sonic Marker Beacon for Fog Aviation.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 26—29.

In der vorliegenden Arbeit wird eine akustische Anordnung beschrieben, die das Landen der Flugzeuge im Nebel unterstützen soll und die ganz ähnlich arbeitet wie die bekannten Funkbaken.

Das Gerät besteht im wesentlichen aus 3 Pfeifen mit einer Tonhöhe von 3000 Hz, denen durch Schalltrichter eine ausgeprägte, etwa fächerförmige Richtwirkung gegeben wurde. Die Pfeifen arbeiten mit Preßluft. Mit einer elektrisch angetriebenen Nockenscheibe kann die Luftzufuhr im Takt von Telegraphiezeichen gesteuert werden. Ein größerer Windkessel sorgt für konstanten Druck am Pfeifenfuß.

Die Anwendung des Gerätes geschieht etwa folgendermaßen: Zwei solcher Schallsender werden an gegenüberliegenden Grenzen des Flughafens aufgestellt, und zwar so, daß sie in der Windrichtung hintereinander stehen. Die Schallabstrahlung erfolgt nach oben, etwas zur Mitte des Flugfeldes geneigt. Der eine Sender gibt das Zeichen Punkt-Strich, der andere Strich-Punkt. Durch Synchronisierung beider wird erreicht, daß bei gleichzeitiger Hörbarkeit die Zeichen des einen Senders die Pausen des anderen ausfüllen, so daß der Eindruck eines Dauertones entsteht. Ein Pilot, der im Nebel, durch Kompaß und Funkpeilung geleitet, auf den Flughafen zusteuert, hört beim Überfliegen beispielsweise zunächst das Zeichen Punkt-Strich, über der Mitte des Feldes Dauerton und dann Strich-Punkt. Er kehrt um und bekommt nun durch mehrfaches Überfliegen bei Verringerung der Höhe eine Vorstellung von der Lage und Größe des Flugplatzes. Dabei fällt die Überschneidungszone allmählich aus und die Hörbarkeit der Signale wird immer besser und kürzer, die Abgrenzungen des Landefeldes treten schärfer heraus. Die endgültige Landung erfolgt dann mit Hilfe eines Echolotes.

Die Signale sind nach angestellten Versuchen in einer geschlossenen Maschine mit 220 Ps-Motor ohne Hörhilfen in 250 m Höhe noch klar vernehmbar. Unter Verwendung besonderer Höreinrichtungen, wie sie z. B. für Echolote benutzt werden, konnten die Zeichen noch in einer Höhe von 650 m in einer offenen 450 Ps-Maschine deutlich gehört werden.

G. BUCHMANN

Chester W. Rice. **Sonic Locator. An Aid to Fog Navigation.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 30—33.

Der Verfasser beschreibt ein Echolot, das in erster Linie dazu dient, den Schiffsführer im Nebel auf in seiner Fahrtrichtung liegende Hindernisse aufmerksam zu machen.

Die Anordnung besteht aus einem Senderschalltrichter und einem Paar Empfängertrichter für zweiohriges Hören, die so zusammen auf einem Drehgestell befestigt sind, daß sie in die gleiche Richtung zeigen und dem Beobachter gestatten, einen Horizontwinkel von mehr als 180° abzusuchen. Im „akustischen Brennpunkt" des Sendertrichters ist eine 3000 Hz-Preßluftpfeife angeordnet. Die Empfängertrichter sind über 2 gegen Störschall gut geschützte Hochpaßfilter mit 2 Hörschläuchen verbunden. Die gesamte Anordnung wird auf dem Dach eines Deckshauses angebracht und vom Innern wie ein Peilrahmen bedient.

Die Arbeitsweise ist im allgemeinen folgende: Die Apparatur wird in Fahrtrichtung gestellt. Der Beobachter gibt ein kurzes Pfeifsignal, das er infolge der ausgeprägten Richtwirkung von Sender und Empfänger in angenehmer Lautstärke hört. Gleichzeitig wird eine Stoppuhr ausgelöst. Hört der Beobachter ein Echo von einem in der Senderichtung befindlichen Gegenstand, so hält er die Stoppuhr an und kann an dieser direkt die Entfernung des Hindernisses ablesen. Das Signal wird etwa alle 5 Sek. gegeben. In ähnlicher Weise kann auch die Fahrt längs einer Küstenlinie geleitet werden, indem fortlaufend der Abstand vom Ufer gelotet wird. Wie die mit der Apparatur ausgeführten Versuche zeigen, lassen sich damit ausgedehntere Gegenstände noch auf etwa 800 m Entfernung feststellen. Bei einer Tonnen- oder Kegelboje (0,6 × 1,2 m) dagegen wird das 1. Echo erst bei einem Abstand von 80—160 m gehört. Betrachtungen über Fahrtgeschwindigkeit und Manövrierzeit ergeben, daß auch für eine Annäherungsgeschwindigkeit von 50 km/h noch genügend Zeit zur Kursänderung bleibt.

Der Verfasser beschreibt dann die Durchführung einer Fahrt von New London nach Fishers Island im Nebel, wobei sich die Apparatur sowohl als Schutz vor Zusammenstößen als auch zur Ortsbestimmung gut bewährte.

Wesentlich für das gute Arbeiten der Anordnung ist die hohe Tonlage des Senders, wodurch sich eine starke Richtwirkung erreichen läßt, und die Verwendung eines Hochpaßfilters, das Störschalle wie Wellenrauschen, Maschinengeräusche usw. weitgehend ausschaltet. Als besonders vorteilhaft wird ein einstellbares Filter hervorgehoben, mit dem es möglich ist, in ruhigen Zeiten auch Glockenbojen, Nebelhörner usw. stereoakustisch zu peilen.

G. Buchmann

S. S. Stevens und H. Davis, **Psychophysiological Acoustics: Pitch and Loudness.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 1.

Um einen Zusammenhang zwischen der Hörempfindung und der Funktion des Gehörorgans zu finden, werden einerseits die Größen der physiologischen Akustik (Hörschwelle, Tonhöhe, Lautstärke)[1]) in Abhängigkeit von der entsprechenden akustischen Reizung (Frequenz, Intensität), andererseits die bei den gleichen akustischen Reizen von den Cortischen Fasern in der Schnecke des inneren Ohres erzeugten elektrischen Spannungen untersucht. Die Wechselbeziehungen werden unter weitgehender Verwendung von Ergebnissen früherer Arbeiten aufgestellt zwischen den Hörempfindungsmessungen am Menschen und histologisch-operativen Versuchen an Katzen und Meerschweinchen. Es ergeben sich eine Reihe von bemerkenswerten Analogien.

Die Abhängigkeit der in der Schnecke gerade noch meßbaren elektrischen Spannungen (Schwellenwerte) von der Frequenz und Intensität des akustischen Reizes (J. Acous. Soc. Am. 6 [1935], S. 205) verläuft ganz ähnlich wie die Hörschwellenkurve.

Aus der längs des Hörfrequenzbereiches überall bekannten Größe der Tonhöhen-Unterschiedsschwelle und einer Voraussetzung, daß zu jeder Unterschiedsschwelle eine gleich große Entfernung auf der Basilarmembran gehören möge, läßt sich die genaue Verteilung der Frequenzen auf der Basilarmembran des menschlichen Ohres durch Integration berechnen (J. Acous. Soc. Am. 3 [1931], S. 275). In guter Übereinstimmung damit steht die mit Hilfe örtlicher Verletzungen ermittelte Frequenzverteilung auf der Basilarmembran des Meerschweinchens.

Bei größerer Schallintensität zeigt sich eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den Intensitätswerten, die zur Erzeugung einer für alle Frequenzen konstanten elektrischen Spannung in der Schnecke erforderlich sind, und den entsprechenden subjektiven Meßwerten, den Kurven gleicher Lautstärke. Für die Form dieser Kurven scheint also das Gehörorgan selbst und nicht das zentrale Nervensystem verantwortlich zu sein.

Die Lautheitsfunktion von Churcher (J. Acous. Soc. Am. 6 [1935], S. 216), d. h. die durch subjektive Halbierung gemessene Lautheit in Abhängigkeit von der eintreffenden Schallintensität bei gleicher Frequenz, läßt sich durch eine analoge Beziehung zwischen der Intensität eines reinen Tones (z. B. 1000 Hz) und der dadurch verursachten elektrischen Spannungen nur angenähert nachbilden. Verschiedene Abweichungen, besonders bei großen Intensitäten, werden theoretisch zu erklären versucht und im Zusammenhang damit die Möglichkeit eines prinzipiellen Unterschiedes zwischen den Eigen-

[1]) Von den Verfassern als „psychological" bezeichnet.

schaften der Ohren von Mensch und Meerschweinchen, sowie der Einfluß der während der Tierversuche vorgenommenen Lokalanästhesie auf die Funktion des Ohres erörtert.

Setzt man das Ohr einem akustischen Reiz aus, der langsam bis zu sehr großen Intensitätswerten anwächst und dann allmählich wieder bis Null zurückgeht, so macht sich im Verlauf der Spannungskurve eine deutliche Hysterese- oder Ermüdungserscheinung bemerkbar. Das Maximum der erzeugten Spannung liegt beträchtlich vor der Erreichung der größten (End-)Intensität. Oberhalb des Spannungsmaximums treten starke nichtlineare Verzerrungen auf. Durch Dauerversuche dieser Art gelingt es, das Cortische Organ zu zerstören.

Versuche und Überlegungen über die Fortleitung der durch verschiedenartige Reize verursachten elektrischen Vorgänge führen schließlich zu der Hypothese, daß die subjektive Lautstärke proportional zu der von den Cortischen Fasern erzeugten Spannung und zu der Anzahl der angeregten Nervenfasern ist.

Die Lautheitsfunktion stimmt nicht mit der Kurve überein, die aus einer Integration der Lautstärke-Unterschiedsschwellen folgt (J. Acous. Soc. Am. 4 [1933], S. 211). Aus dieser Abweichung wird eine Beziehung hergeleitet, die Aussagen über die Gesamtzahl der wirksamen Nervenfasern und über die Art der Erregung der einzelnen Unterschiedsschwellen zuläßt. Danach müßte zur Anregung einer neuen Nervenfaser der Reiz um mehrere Unterschiedsschwellen anwachsen. Zur Erklärung dieser Folgerung wird die Möglichkeit diskutiert, daß schon der Wechsel zwischen unterbrochener und kontinuierlicher Beanspruchung einer Nervenfaser sich als Unterschiedsschwelle auswirken könnte.

Im Anhang werden Einzelheiten über die aus den Tierversuchen ermittelten elektrischen Beziehungen des inneren Ohres mitgeteilt. E. Thienhaus

William B. Snow, **Change of Pitch with Loudness at Low Frequencies**. J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 14.

Aus früheren Arbeiten ist bekannt (J. Acous. Soc. Am. 6 [1934], S. 59), daß die Tonhöhenempfindung reiner Töne, vor allem im unteren Frequenzgebiet, nicht unabhängig von der Lautstärke ist. Mit einer Gruppe von neun Versuchspersonen stellt der Verfasser aufs neue über diese Frage unter Verwendung a) eines Kopfhörers, b) eines Lautsprechers subjektive Vergleichsmessungen an, und zwar innerhalb eines Lautstärkebereiches von 20—120 Phon und eines Frequenzbereiches von 75—1000 Hz. Der zu messende Ton bestimmter Frequenz- und Lautstärke wird dem Beobachter in ständigem Wechsel mit einem Normalton von 40 Phon Lautstärke dargeboten. Dabei wird die Frequenz des Normaltones solange geändert, bis für beide Töne der Tonhöheneindruck gleich ist. Es bestätigt sich, daß die Tonhöhe mit wachsender Lautstärke stets abzunehmen scheint. Die Tonhöhenänderungen sind am größten in der Gegend von 100 Hz, während sie nach tieferen und höheren Frequenzen kleiner werden; oberhalb 1000 Hz sind sie praktisch zu vernachlässigen. Wenn sich auch, besonders bei der Lautsprecher-Meßreihe, eine beträchtliche Streuung und individuelle Verschiedenheit in den Ergebnissen zeigte, so traten doch grundsätzliche Unterschiede zwischen Kopfhörer und Lautsprecher nicht auf, und es ließ sich im Mittel eine Schar von Kurven gewinnen, die für jede Frequenz die Änderung des Tonhöheneindruckes angibt, wenn die Lautstärke von 40 Phon bis zu dem der betreffenden Kurve zugehörigen Lautstärkeniveau anwächst. Handelt es sich nicht um reine Töne, sondern um Klänge, wie sie in der Musik ausschließlich vorkommen, so ist die Änderung des Tonhöheneindruckes mit der Lautstärke sehr gering (vgl. auch das folgende Referat).

Im Anhang ist die automatisch arbeitende Apparatur ausführlich beschrieben, die die Durchführung längerer Meßreihen vereinfacht und die erzielbare Genauigkeit verbessert. Sowohl die Auswahl der dem Beobachter vorgelegten, willkürlich aufeinander folgenden Frequenzstufen, als auch die Aufzeichnung seines Urteils „höher" oder „tiefer" geschieht selbsttätig. E. Thienhaus

Don Lewis and Milton Cowan, **The Influence of Intensity on the Pitch of Violon and Cello Tones.** J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 20.

Untersuchungen über subjektive Tonhöhenänderungen in Abhängigkeit von der Lautstärke wurden bisher vorwiegend mit reinen Sinustönen angestellt. Verfasser dehnten die Versuche aus auf obertönige Klänge von Geigen und Celli. Mehrere gute Spieler wurden aufgefordert, zwei Töne verschiedener Intervalle, deren Grundton durch eine der leeren Saiten festgelegt war, leise und laut erklingen zu lassen. Vorausgesetzt wurde, daß die Spieler subjektive Tonhöhenänderungen, die sich etwa in verschiedenem Grade bei den zwei Tönen bemerkbar machen würden, durch verändertes Greifen ausglichen. Bei Aufnahme der Schallschwingungen mit Oszillograph zeigten sich verschwindend kleine Abweichungen der Intervallgrößen bei 30 db Lautstärkeunterschied. Die Versuche sind in Übereinstimmung mit Messungen von Fletcher an synthetischen Klängen, bei welchen die subjektiven Tonhöhenänderungen von obertönigen Klängen weit hinter denen reiner Töne zurückbleibt. Lottermoser

Winston E. Kock, **Certain Subjektive Phenomena Accompanying a Frequency Vibrato.** J. acoust. Soc. Amer. 8 (1936), S. 23.

Es wurden die Gründe dafür gesucht, daß eine schnelle Frequenzmodulation vom Ohre ähnlich emp-

funden wird wie eine schnelle Intensitätsmodulation. Mit Hilfe zweier Glimmlampenoszillatoren gelingt es, durch schnelle Umschaltung von einer Modulationsart auf die andere, Vergleiche der subjektiven Wirkung anzustellen. Das Vibrato klingt wie ein rasches chromatisches Durchlaufen mehrerer benachbarter Töne. Obwohl alle Frequenzen mit gleicher Intensität wiedergegeben werden, hört das Ohr einen Akzent größerer Intensität auf einem beliebigen Ton, so daß das Frequenzvibrato zugleich als Amplitudenschwankung gehört wird. Klingen ein Vibratoton und ein konstanter Ton zusammen, so hört man Unreinheiten zwischen beiden nicht, weil das Ohr vorwiegend die reine Harmonie heraushört. Wenn beide Vibratoarten in gleicher Phase auf das Ohr wirken, dann wird durch das Amplitudenvibrato einer bestimmten Frequenz eine größere Intensität verliehen und das Ohr hört natürlich diese Frequenz besonders stark heraus. Nach den Versuchen soll das Frequenzvibrato nur durch „rhythmisches Empfinden des Hörers" als Intensitätsvibrato gehört werden.

LOTTERMOSER

HARRY F. OLSON und FRANK MASSA, **Compound-Horn-Loudspeaker**. J. Acous. Soc. Am. 8 (1936), S. 48.

Eine gleichmäßige Abstrahlung der Frequenzen von 50 bis 9000 Hz ist mit einem einzigen freistrahlenden Lautsprecher praktisch nicht zu erzielen, insbesondere dann nicht, wenn der Wirkungsgrad 30% oder mehr betragen soll. Zur Erfüllung dieser Forderung wurden bisher stets 2 oder mehr Systeme verwendet und das Frequenzband entsprechend aufgeteilt. Die Verf. haben sich die Aufgabe gestellt, unter Anwendung von Trichtern mit einem einzigen System eine gleichmäßige Abstrahlung von 50 bis 9000 Hz zu erhalten mit einem Wirkungsgrad von 30 bis 50 %. In einer theoretischen Betrachtung werden die Eigenschaften von unendlichen konischen und exponentiellen Trichtern besprochen und die Ausdrücke für die Ein- und Ausgangsimpedanz des endlichen Exponential-Trichters diskutiert. Der Wirkungsgrad eines Konus-Lautsprechers am Trichter wird angegeben und der Verlauf als Funktion der Frequenz berechnet, wobei als Parameter der Eingangsquerschnitt gewählt ist. Die theoretischen Kurven zeigen, daß mit abnehmendem Eingangsquerschnitt der Wirkungsgrad bei hohen Frequenzen stark wächst, bei tiefen dagegen abnimmt. Aus dieser Tatsache heraus ist der Compound-Horn-Lautsprecher entstanden. Er besteht darin, daß ein einziger Konus-Lautsprecher von ca. 7 cm Durchmesser an einen kurzen Exponential-Trichter von nur 15 cm² Eingangsöffnung angeschlossen wird (Grenzfrequenz des Trichters 500 Hz). Die Rückseite der Membran ist mit einem Trichter verbunden, dessen Eingangsquerschnitt 300 cm² beträgt und der als gefalteter Trichter ausgebildet ist (s. Abbildung). Die Grenzfrequenz beträgt 50 Hz. Der Schall wird hier um 4×180^0 gedreht, und die Verf. behaupten, daß die Verluste sehr gering werden, doch fehlt ein zahlenmäßiger Vergleich gegen einen geraden Trichter. Die beiden Trichteröffnungen liegen konzentrisch. Die Schallwellen des Hoch- und Tieftontrichters werden mit entgegengesetzter Phase abgestrahlt. Das soll jedoch praktisch unwichtig sein, da das Überlappungsgebiet sehr klein ist: Der Hochtontrichter wirkt unterhalb seiner Grenzfrequenz als Sperrglied für tiefe Frequenzen; im Tieftontrichter

kann ein akustisches Filter eingebaut werden, welches die hohen Frequenzen sperrt. Die Impedanz- und Frequenzkurve wird gezeigt. Letztere fällt von 2000 Hz an monoton ab. Bei 9000 Hz beträgt der Unterschied gegen den Normalpegel 10 db; das bedeutet einen Abfall des Schalldruckes auf ein Drittel. Von einer gleichmäßigen Abstrahlung über das ganze Frequenzband kann also nicht gesprochen werden. Ein solcher Kurvenverlauf bei hohen Frequenzen ist mit freistrahlenden Konus-Lautsprechern auch zu erzielen, allerdings mit geringerem Wirkungsgrad. Von 50 bis 2000 Hz ist ein Wirkungsgrad von 50% angegeben. Eine Aussage über die Belastung des Systems fehlt, doch dürfte diese nach den Dimensionen maximal bis 3 Watt betragen.

Die Arbeit eröffnet einen interessanten Weg für die Entwicklung von Lautsprechern hoher Qualität, insbesondere, da die gesamte Bautiefe nur ca. 50 cm beträgt. In der Praxis wird ein solches Kombinationssystem jedoch nur in solchen Fällen Verwendung finden, wo kleine akustische Leistungen gefordert werden, denn eine Vergrößerung des Lautsprechers und Trichters für größere Belastungen ist ohne weiteres nicht durchführbar, da bei größerem Membrandurchmesser die hohen Frequenzen wesentlich schwächer abgestrahlt werden.

F. v. SCHMOLLER

NACHRICHTEN

Kongreß der Hals-, Nasen- und Ohrenärzte

Berlin, August 1936

Vom 17.—22. August fand in Berlin der III. Internationale Oto-Rhino-Laryngologen-Kongreß statt. Er wurde mit einer Ansprache des Herrn Reichsministers für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung eröffnet. Die Leitung der wissenschaftlichen Sitzungen hatte Prof. Dr. C. von Eicken. Dem Kongreß lagen drei Hauptthemen zugrunde, von denen hier nur über das eine, das elektroakustische Hörprüfungs- und Hörverbesserungsgerät berichtet werden soll. Zu diesem Thema wurden zwei Referate[1]) erstattet, über die physiologisch-otologische Seite sprach B. Langenbeck, Leipzig, über die physikalischen Eigenschaften der elektrischen Hörschärfemesser und Hörhilfen E. Meyer, Berlin. Langenbeck kommt in seinem umfassenden Referat, das den alten Stimmgabelprüfungen die neuen audiometrischen Verfahren gegenüberstellt, zu dem Schluß, daß die letzteren sehr viel genauer als bisher eine Schwerhörigkeit feststellen lassen. Er berichtet dabei über ein sehr schönes von ihm erzieltes Ergebnis, nämlich die Auffindung der Regel, daß in den Hörverlustkurven von erbkranken Personen auf beiden Ohren symmetrische Hörreste vorhanden sind. Es ist ja bekannt (Untersuchungen von E. Waetzmann), daß auch im normalen Falle eine Symmetrie der Schwellenkurven in beiden Ohren vorliegt und daß vor allem Eigentümlichkeiten in den Hörkurven sich vererben. Eine zweite wichtige Anwendung der elektrischen Hörschärfemesser erfolgt bei geringer Schwerhörigkeit, in denen man durch eine genaue, in der Frequenz kontinuierliche Untersuchung einen Ausfall gewisser Töne und damit eine Frühdiagnose beginnender Schwerhörigkeit erhalten kann.

Die grundsätzlich zu fordernden physikalischen Eigenschaften der Hörschärfemesser wurden in dem zweiten Vortrag zusammengestellt. Als Hörschärfemesser dienen Überlagerungssummer oder Niederfrequenzsummer. Ein besonders geeignetes Gerät dieser Art ist das Sonotone-Audiometer, das von V. O. Knudsen und J. H. Jones konstruiert und in einer besonderen, dem Kongreß vorgelegten Abhandlung beschrieben worden ist. Der Hörverlust des pathologischen Falles gegenüber dem normalen Gehör kann unmittelbar an einer Skala in db eingestellt werden. Die audiometrischen Verfahren sind physikalisch wesentlich genauer als die Stimmgabelprüfungen. Zwar kann auch im letzteren Fall bei Kenntnis der Abfallkonstanten a (db/sec) der Stimmgabel und bei Bestimmung der Hörzeit t_0 im normalen Fall und der Hörzeit t_1 im pathologischen Fall der Hörverlust in db zu $a\,(t_0 - t_1)$ berechnet werden, doch bringen geringe Änderungen im Anschlag und in der Lage der Stimmgabel vor dem Ohr sowie in ihrer Richtung sehr verschiedene Ergebnisse. Das Audiogramm, d. h. der Hörverlust in db über der Frequenz, kann unter Verwendung eines Lautsprechers oder eines Telephons in Luftleitung, unter Benutzung eines Knochenfernhörers in Knochenleitung aufgenommen werden. Der zweite Teil des Vortrages beschäftigte sich mit den elektrischen Hörhilfen. Für sie ist es grundsätzlich möglich, jede gewünschte verzerrungsfreie oder nach dem Audiogramm des betreffenden Schwerhörigen verzerrte Schallübertragung einzustellen („Akustische

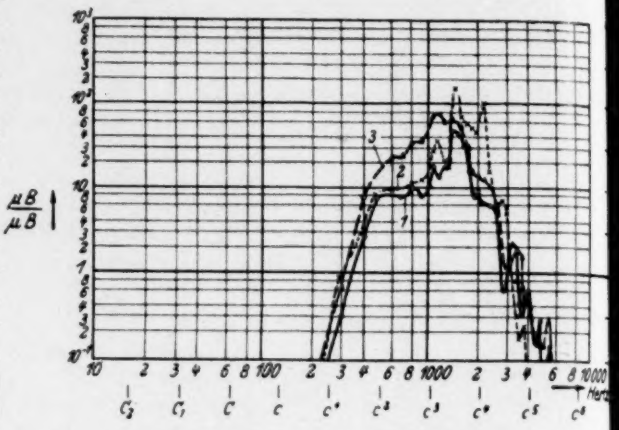


Abb. 1. Frequenzkurven einer Mikrophon-Telephonanlage. Kurve 1 Schalldruck 0,3 μB; Kurve 2 Schalldruck 3 μB; Kurve 3 Schalldruck 0,3 μB; Mikrophonverstärker.

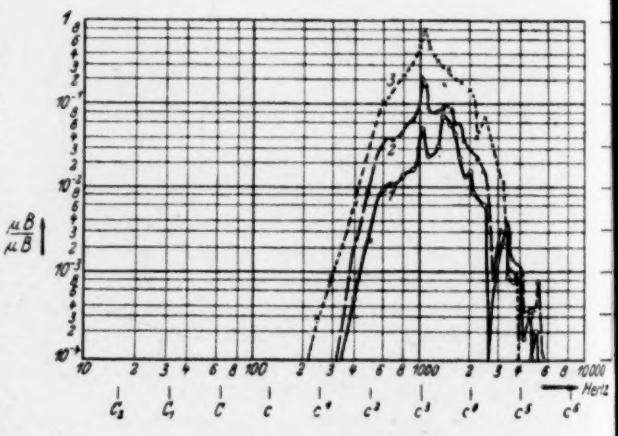


Abb. 2. Frequenzkurve einer Mikrophon-Knochen-Höreranlage. Kurve 1 Schalldruck 0,3 μB; Kurve 2 Schalldruck 3 μB; Kurve 3 Schalldruck 3 μB; Mikrophonverstärker.

[1]) Z. Hals- usw. Heilk. 40 (1936), H. 1—3, S. 201 bis 294.

Brille"). Doch ist damit in allen Fällen ein größerer Apparateaufwand, insbesondere die Mitnahme eines Verstärkers erforderlich. Aus diesem Grunde werden in der Regel nur Kohlemikrophon-Telephon-Anlagen benutzt, die von den Schwerhörigen unauffällig getragen werden können. Für fast alle der im Handel befindlichen Geräte wurden unter Benutzung eines subjektiven Vergleichsverfahrens die Frequenzkurven durchgemessen. Abb. 1 und 2 geben hierfür Beispiele; als Ordinate ist die Verstärkung (Schalldruck vor dem Aufnahmemikrophon zu Schalldruck im Wiedergabesystem bzw. beim Knochenhörer äquivalenter Schalldruck) aufgetragen. Die Messungen sind für verschiedene Intensitäten (0,3, 3 μB; nichtlineare Verzerrung des Kohlemikrophons) und z. T. unter Benutzung eines den Geräten beigegebenen Verstärkers (Kohlemikrophonverstärker mit Resonanzstelle zwischen 2000 und 3000 Hz) gemacht worden. Der Frequenzbereich ist bei den meisten Geräten etwa gleich und erstreckt sich von 200—3500 Hz; die Maximalverstärkung beträgt in Luftleitung rd. 40 db, in Knochenleitung etwa 0 db. Die Knochenleitungshörer sind für diejenigen Fälle vorgesehen, in denen die Schalleitung im Mittelohr nicht in Ordnung ist. Die Kurven zeigen, daß gerade die für Verständlichkeit notwendigen hohen Frequenzen recht schlecht wiedergegeben werden.

An die Vorträge schloß sich eine rege Aussprache an, an der unter anderem die Herren Struyckyen, Quix, Mittermaier teilnahmen. In dieser Aussprache wurde seitens der Vertreter der alten Hörschärfemeßverfahren auf die gute Konstanz von Stimmgabeln und Monochorden verwiesen; die Überlegenheit der elektrischen Meßverfahren wurde von der Mehrzahl anerkannt.

Die außerordentlich interessante Tagung, zu der 33 Nationen Vertreter entsandt hatten, fand ihren Abschluß durch ein von der Reichsregierung gegebenes Festbankett, bei dem der Herr Reichsminister Dr. Frick das Wort zu einer Ansprache ergriff.

E. Meyer

13. Große Funkausstellung

Berlin, September 1936

Die diesjährige Große Deutsche Funkausstellung zeigte die nicht nur vom Standpunkt des Akustikers erfreuliche Tendenz zur klanglichen Vervollkommnung der Empfangsgeräte. Anscheinend ist die Entwicklung des Hochfrequenzteiles der Rundfunkempfänger zu einem gewissen Abschluß gekommen, so daß man sich mehr dem Niederfrequenzteil und den Lautsprechern zuwenden kann.

Eine große Zahl der Empfänger ist diesmal mit verhältnismäßig starken Endröhren ausgerüstet. Anstelle der bisher in hochwertigen Wechselstromapparaten benutzten Endröhre Telefunken RE 604 oder Valvo LK 460 ist eine neue Endröhre AD 1 getreten. Das bedeutet eine Steigerung der Niederfrequenzleistung von 2 auf 4,2 Watt bei einem Klirrfaktor von 5%. In der Mittelklasse der Fernempfänger ist die neue Endröhre AL 4 wegen ihrer größeren Verstärkung am meisten verbreitet. Sie

Abb. 1. Telwa, piezo-elektrischer Lautsprecher

kann eine Niederfrequenzleistung von 3,3 Watt bei einem Klirrfaktor von 5% abgeben.

Für Gleich- und Allstromgeräte ist es bekanntlich wegen der zur Verfügung stehenden kleinen nutzbaren Anodenspannung schwieriger, eine Endstufe genügender Leistung zu bauen. Eine wirklich befriedigende Lösung dieser Aufgabe ist besonders bei

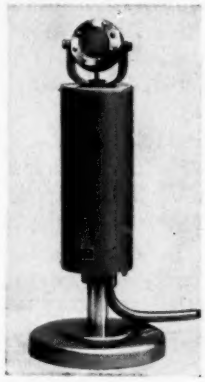


Abb. 2. Telwa Kondensatormikrophon

Empfängern für 110 Volt Gleichstrom bisher noch nicht gefunden. Die Spitzengeräte fast aller Firmen werden deshalb nur als Wechselstromgeräte geliefert.

Die Firma Philips versucht die Schwierigkeit dadurch zu umgehen, daß sie für ihren Superhet einen besonderen Pendelumformer (Wechselrichter) zur Umformung des Gleichstroms in Wechselstrom liefert.

Gleichlaufend mit der Steigerung der Niederfrequenzleistung werden im allgemeinen etwas größere Lautsprecher, zum Teil auch Lautsprecherkombinationen verwandt.

Von der Firma Siemens & Halske A. G. wurde ein Gerät gezeigt, das wohl das zur Zeit erreichbare Optimum an ton- und klangrichtiger Wiedergabe bietet. Dieses sog. Kammermusikgerät verzichtet